EL UNIVERSO MADURO • EL VIRUS DE LA GRIPE DE 1918

INVESTIGACION y CIENCIA

MARZO 2005
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

CRIPTOGRAFIA CUANTICA

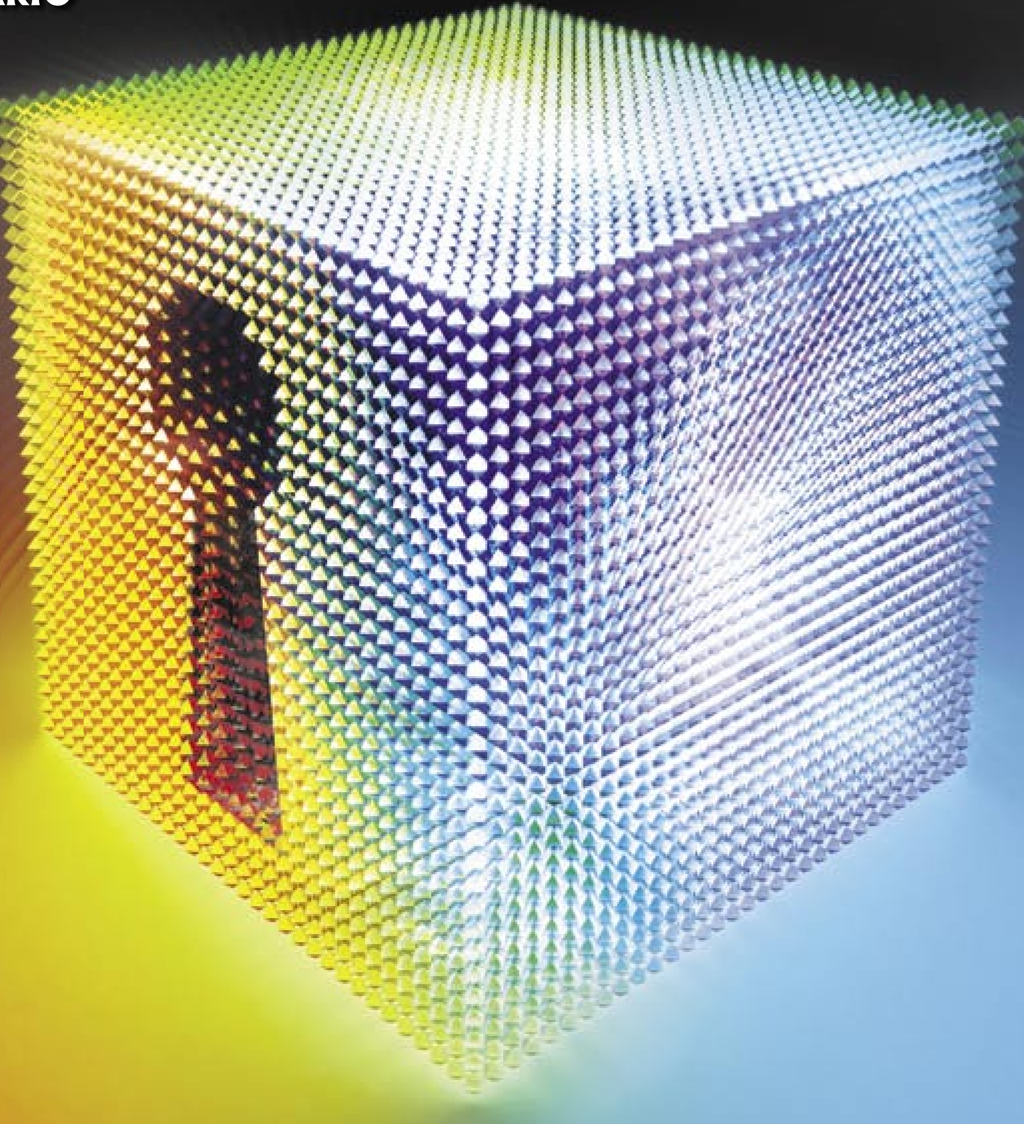
EL SISTEMA INMUNITARIO DE ALERTA PRECOZ

EL MITO DE LA AUTOESTIMA

LA CECA DE IULIA TRADUCTA

GEOMETRIA NO CONMUTATIVA Y ESPACIOTIEMPO CUANTICO

GASES DE FERMI ATRAPADOS OPTICAMENTE

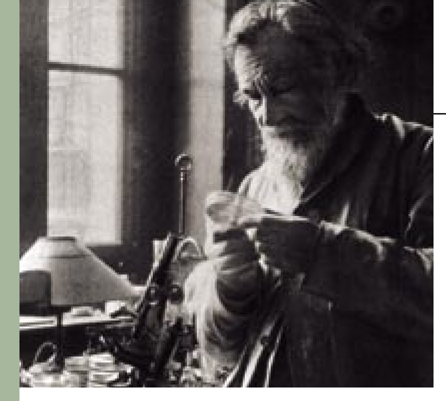




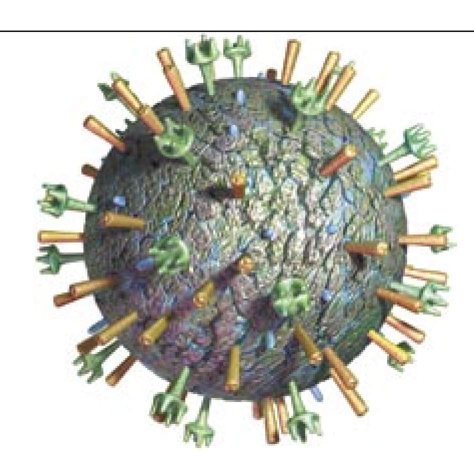


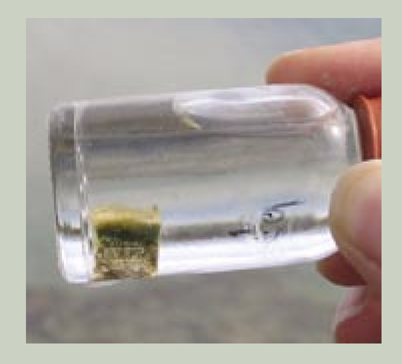
Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

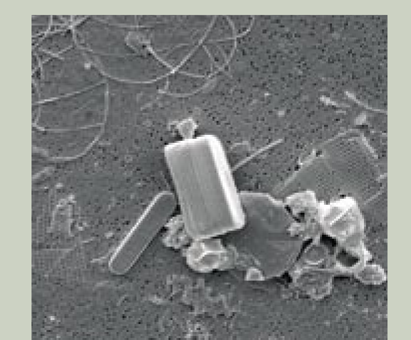
Marzo de 2005
Número 342













DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley,
Graham P. Collins, Steve Mirsky,
George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL
Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER
Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

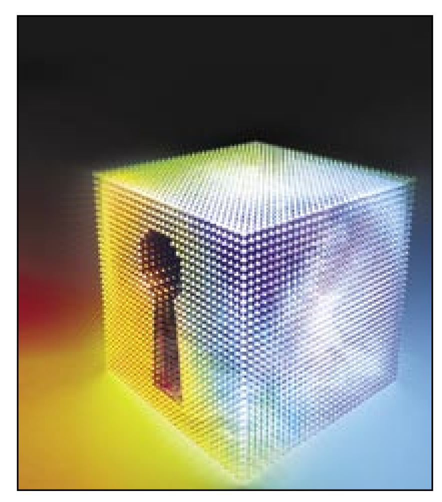
Madrid:
GM Exclusivas Publicidad
Menorca, 8, Bajo, Centro Izda.
28009 Madrid
Tel. y Fax 914 097 046

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Felipe Cortés: *El sistema inmunitario de alerta precoz*; M.ª Rosa Zapatero: *El universo maduro* y *Gases de Fermi atrapados ópticamente*; Josep-Maria Gili: *El ojo del observador*; M.ª José Báguena: *El virus de la gripe de 1918*; Ramón Pascual: *Criptografía cuántica comercial*; Luis Bou: *El mito de la autoestima*; J. Vilardell: *Hace..., Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Pere Molera: *Taller y laboratorio*



Portada: Kenn Brown

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Extranjero	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados
es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

MUROS DE CIERRE. «La expresión 'muro de cierre' se emplea hoy para designar el revestimiento, forro o 'piel' de los edificios modernos. Su aspecto difiere sobremanera del de su antecesor, el antiguo muro de carga. Constituye un gran avance en la evolución de la arquitectura. La especialización estructural que separa en los edificios la piel del esqueleto se corresponde con la especialización que los tejidos biológicos han adquirido en el transcurso de la evolución. Sin embargo, ningún revestimiento arquitectónico moderno iguala en prestaciones a la piel biológica. El muro de cierre es un elemento pasivo, incapaz de ajustarse a un entorno exterior cambiante. Debería poder intervenir activamente en el esfuerzo que realiza el edificio para mantener su estabilidad interna. —James Marston Fitch»

NILO OCCIDENTAL. «En 1950, en un estudio epidemiológico sobre la parálisis infantil en un pueblo del norte de El Cairo, las muestras de sangre de tres niños dieron positivo respecto al virus del oeste del Nilo. El hallazgo causó conmoción, pues nadie había visto un caso humano de esa infección desde la original de 1937. Otros estudios egipcios no tardaron en mostrar que Egipto constituía un caldo de cultivo para la infección del oeste del Nilo; cerca del 100 por ciento de los adultos muestreados resultaron portadores de anticuerpos. El virus del oeste del Nilo se ha aislado no sólo en niños egipcios sino también en mosquitos (del género *Culex*), cornejas cenicienta y palomas. Una amplia variedad de huéspedes.»

...cien años

LA MÁQUINA DE ESCRIBIR. «Un abismo separa el ambiente silencioso de la celda del monje escribano del vivo tableteo de la moderna máquina de escribir, que en un cuarto de siglo ha revolucionado y transformado el mundo de los negocios. Su llegada señala el comienzo de una nueva era de progreso no inferior al que acompañó la aparición del telégrafo y el teléfono.»

LAS TUMBAS DE MUKDEN. «Estas tumbas de Manchuria se hallan en una llanura, de forma que todos los enterramientos se pueden observar fácilmente desde una colina cercana. Los antiguos emperadores manchú-tártaros llegaron a ofrecer sacrificios en las tumbas de sus antecesores, pero esa práctica se interrumpió hace largo tiempo. La Calzada Sagrada constituye el elemento más interesante de este cementerio. Está bordeada en ambos costados por colosales estatuas monolíticas, separadas por trechos de unos 200 metros. En total se levantan treinta y seis estatuas, de las que veinticuatro representan animales (*véase la ilustración*) y doce, altos dignatarios.»

...ciento cincuenta años

CONFUSIÓN. «Al capitán Norton debemos varias innovaciones de suma utilidad para balas y granadas. Hace más de diez años las recomendó a los responsables del ejército británico; éstos, sin embargo, hicieron caso omiso. Ahora que el peligro amenaza en Crimea, se arrepienten de no haberle prestado atención. En 1826 fue mostrada a Lord Fitzroy Somerset (hoy Lord Raglan) una de las granadas de percusión para cañón de Norton. El personaje replicó: 'Todas las invenciones para mejorar el armamento tienden a poner a los débiles a la altura de los fuertes; puesto que nosotros somos los fuertes, no apoyamos tales mejoras'. No podría ofrecerse mejor prueba de la incapacidad de Lord Raglan para dirigir la guerra de Crimea que la anterior muestra de aturdimiento y ceguera.»

ROCAS FLOTANTES. «En la isla de Manhattan se contemplan incontables rocas sueltas de todos los tamaños, desde pequeños cantos a grandes peñascos de varias toneladas de peso. Esas rocas no se formaron donde se hallan y ninguna mano humana las llevó hasta allá. ¿De dónde vinieron? La única teoría plausible sostiene que los lugares donde ahora se hallan fueron antaño un lecho marino, sobre el que flotaban icebergs procedentes de un océano ártico, con dichas piedras adheridas a ellos; corrientes de agua cálidas los habrían derretido y así se habrían liberado sus cargas pedregosas. Sin embargo, concebir un período en que grandes icebergs flotaran sobre el lugar donde ahora se alza la ciudad de Nueva York resulta tan fantasioso como creer en la maravillosa lámpara de Aladino.»



Estatua colosal en Mukden (comienzo de la dinastía Qing). Actual Shenyang, 1905.

APUNTES

INCENDIOS FORESTALES

Los efectos del fuego

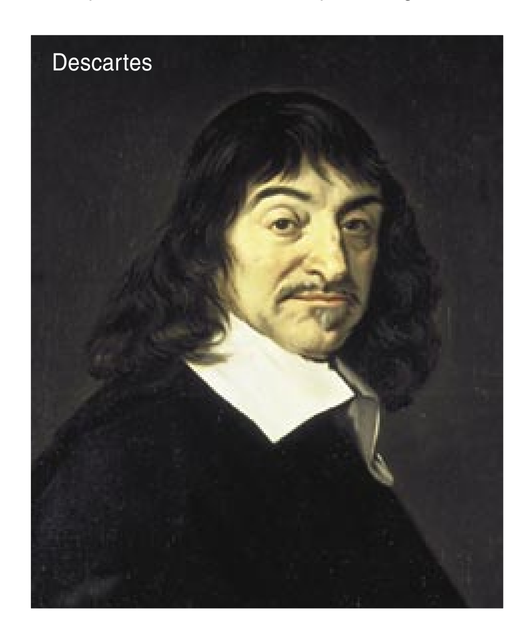
Según Pascal, el enterado desprecia la opinión del vulgo, pero el que de verdad entiende (es decir, el propio Pascal), opina como el pueblo, sólo que por otras razones. El vulgo cree que es mejor apagar siempre los incendios forestales; los expertos, que muchos bosques necesitan del fuego, que el fuego es parte de su ciclo de vida, hasta el punto de que conviene a veces provocar incendios controlados. Haber apagado durante docenas de años los fuegos, dicen, ha hecho de los montes una densa yesca que convierte en deflagraciones letales incendios que, en otras circunstancias, hubieran facilitado la regeneración posterior. El viejo Icona, en medio de oleadas de incendios, hasta publicó un anuncio cantando las excelencias científicas del fuego. Pero el fuego, natural o provocado, no siempre coexiste con el bosque; más que parte de su autorregeneración, puede ser agente de su extinción. La actual deforestación del interior de Australia se atribuye ahora a las quemas que efectuaron los primeros colonizadores, hará unos 50.000 años. De acuerdo con cierta simulación informática, el fuego natural ha limitado en los últimos seis u ocho millones de años, sin que se sepa el origen del proceso, la extensión de los bosques en muchas partes del planeta, sobre todo en Africa y Sudamerica. Sin el fuego, desaparecían en la simulación grandes extensiones de prados y sabanas, sustituidos por árboles.Y la razón de la mayor o menor agresividad de los fuegos en sistemas forestales concretos podría guardar relación con los cambios climáticos. Según otro estudio, la prevalencia de los incendios de baja intensidad en equilibrio con una densidad baja de los bosques de pinos ponderosa en el oeste norteamericano se correlaciona con períodos históricos más fríos, como el habido entre los siglos XV y XX. En cambio, durante períodos más cálidos, como el actual y la baja Edad Media, ocurren fuegos que acaban en un cambio del tipo de vegetación.

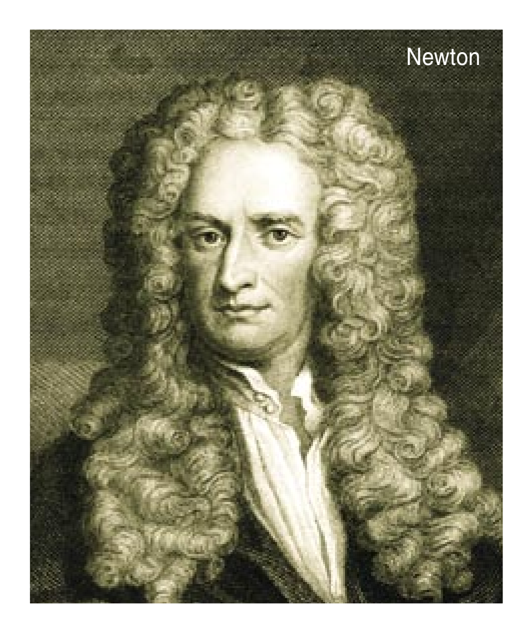


REVOLUCION CIENTIFICA

¿Lleno o vacío?

Los filósofos de las postrimerías del siglo XVII decían aplicarse a la “nueva filosofía”, donde la novedad designaba la oposición al aristotelismo anquilosado en las aulas universitarias. Pero no había una sola filosofía nueva. Las rivalidades iban incluso por naciones. De una manera hiperbólica lo recuerda Voltaire (1694-1778) en sus *Cartas filosóficas*: “Un francés que amanezca en Londres caerá pronto en la cuenta de que allí rige otra filosofía también. Advierte que ha dejado un mundo pleno, para encontrar otro vacío. En París se habla de un mundo compuesto de vórtices y materia sutil. Nada de eso hay en Londres, donde la presión de la Luna es la que provoca las mareas.” Voltaire contrapone la filosofía natural de Descartes a la de Newton. En Descartes los fenómenos de la naturaleza se explicaban mediante materia y movimiento; todos los cuerpos constaban de partículas mínimas e invisibles, que conformaban diversas combinaciones y disposiciones a través de movimientos. No cabían espacios vacíos. Si algo cambiaba de lugar, otro cuerpo o partícula ocupaba el sitio abandonado. Newton dejaba, por contra, amplia cancha a la atracción, a la acción a distancia.


Descartes


Newton

ZOOLOGIA

Ballenas y buzos

Los biólogos marinos suponían que las ballenas eran inmunes a sufrir el mal de descompresión que padecen los buzos cuando ascienden demasiado deprisa desde las profundidades. Pero las ballenas expuestas a las señales de los sonares militares muestran síntomas agudos que recuerdan al mal de los buzos. En la Fundación Oceanográfica de Woods Hole han descubierto en esqueletos de cachalotes adultos, reunidos desde 1870, alteraciones óseas. El deterioro, que se agrava con la edad, concuerda con el tipo de daños óseos que sufren quienes se sumergen a grandes profundidades. Si el mal de los buzos es la causa de esas degeneraciones, es probable que las ballenas hayan desarrollado conductas que lo eludan, como la emersión gradual. Perturbaciones como el sonar quizás alteren ese comportamiento de prevención adquirido y causen la patología descubierta. *—J. R. Minkel*



Las ballenas no son inmunes a la enfermedad de la descompresión.

BIOLOGIA

Vida en Atacama

No se habían encontrado microorganismos en el suelo del desierto de Atacama, donde llueve como mucho una vez cada diez años. Pero un equipo de la Universidad de Arizona ha desmentido la idea arraigada de la esterilidad de ese terreno. Han cavado cada 300 metros a lo largo de cerca de 200 kilómetros. Tras cada cota, desinfectaban la paleta utilizada. Antes se había excavado sólo hasta unos 10 centímetros de profundidad; ahora llegaron hasta los 30. Al humedecer las muestras, tomadas en suelos carentes de vegetación desde hace al menos un millón de años, medraron bacterias. Los microorganismos habrían permanecido allí en estado de latencia. La misión Fénix de la NASA realizará en el año 2008 un experimento parecido en Marte. *—Charles Q. Choi*



INFORMATICA

Banda ancha por el tendido

El secreto del acceso universal a Internet por banda ancha quizá "penda sobre nuestras cabezas". El tendido eléctrico puede transportar la banda ancha mediante señales eléctricas de alta frecuencia. Algunas compañías eléctricas europeas y estadounidenses ya lo están ensayando. El problema está en que las bifurcaciones de la red reflejan las señales de la banda ancha y degradan la transmisión. En la Universidad estatal de Pennsylvania hicieron una simulación de lo que ocurriría si las líneas se sincronizaran con los transformadores y otras cargas eléctricas, al objeto de minimizar la reflexión. Descubrieron que así se brindaría a los hogares unas velocidades de transferencia de datos de cientos de megabits por segundo, decenas de veces mayores que las ofrecidas por las mejores transmisiones de ADSL o cable. Un inconveniente de la línea eléctrica de banda ancha: interferiría con señales de radio.

—J. R. Minkel



En principio, las líneas eléctricas proporcionarían un acceso más rápido a Internet que el cable o el ADSL.

FLIP NICKLIN *Minden Pictures (arriba)*; HUBERT STADLER/*Corbis (centro)*; TOM IVES *Corbis (abajo)*

El sistema inmunitario de alerta precoz

La respuesta inmunitaria innata constituye la primera línea de defensa contra microorganismos invasores. Recientes hallazgos relativos a la acción del sistema podrían abrir nuevas vías para el tratamiento de infecciones y trastornos inmunitarios

Luke A. J. O'Neill

Una mujer se encuentra a bordo de un ascensor. Los pasajeros que la acompañan empiezan a estornudar. Mientras ella se pregunta qué enfermedades podrían contagiarle, su sistema inmunitario entra en acción. Si el microbio que dispersan los estornudos corresponde a uno con el que la mujer ha estado ya en contacto, un batallón de células inmunitarias entrenadas —la infantería del sistema inmunitario adaptativo— lo reconocerá y, en cuestión de horas, lo eliminará. Puede incluso que jamás llegue a darse cuenta de que ha sido infectada.

Pero si el virus o bacteria corresponde a uno contra el que nuestra desventurada pasajera nunca ha luchado, acudirá en su auxilio otro tipo de respuesta: el sistema inmunitario "innato". Este sistema de defensa reconoce clases genéricas de moléculas producidas por múltiples y variados agentes patógenos. Cuando detecta alguna de estas moléculas extrañas, el sistema inmunitario dispara una respuesta inflamatoria; en ella, determinadas células del sistema inmunitario se esfuerzan por aislar al invasor con un muro y detener así su propagación. La actividad de estas células —y de los compuestos que segregan— precipita el enrojecimiento y la hinchazón de los puntos afectados; también es responsable de la fiebre, malestar general y otros síntomas gripales que acompañan a numerosas infecciones.

El asalto inflamatorio se inicia mediante los receptores tipo Toll (TLR, de "Toll-like receptors"), una familia de proteínas ancestrales que median la inmunidad innata en una gran variedad de organismos, desde los cangrejos bayoneta (o herradura) hasta los humanos. Si los TLR fallan, el sistema inmunitario se desploma, dejando el cuerpo totalmente expuesto a la infección. Pero si se cae en el extremo opuesto de una respuesta inmunitaria exagerada, el organismo no corre mejor suerte, pues se inducen trastornos caracterizados por inflamación crónica y lesiva: artritis, lupus e incluso enfermedades cardiovasculares.

El entusiasmo que ha generado entre los inmunólogos el descubrimiento de los TLR podría compararse al que causaba antaño el descubrimiento de una tierra desconocida. Numerosos investigadores esperan hallar respuestas a un sinfín de cuestiones inmunológicas aún sin resolver. El estudio de estos receptores, así como de los acontecimientos moleculares que

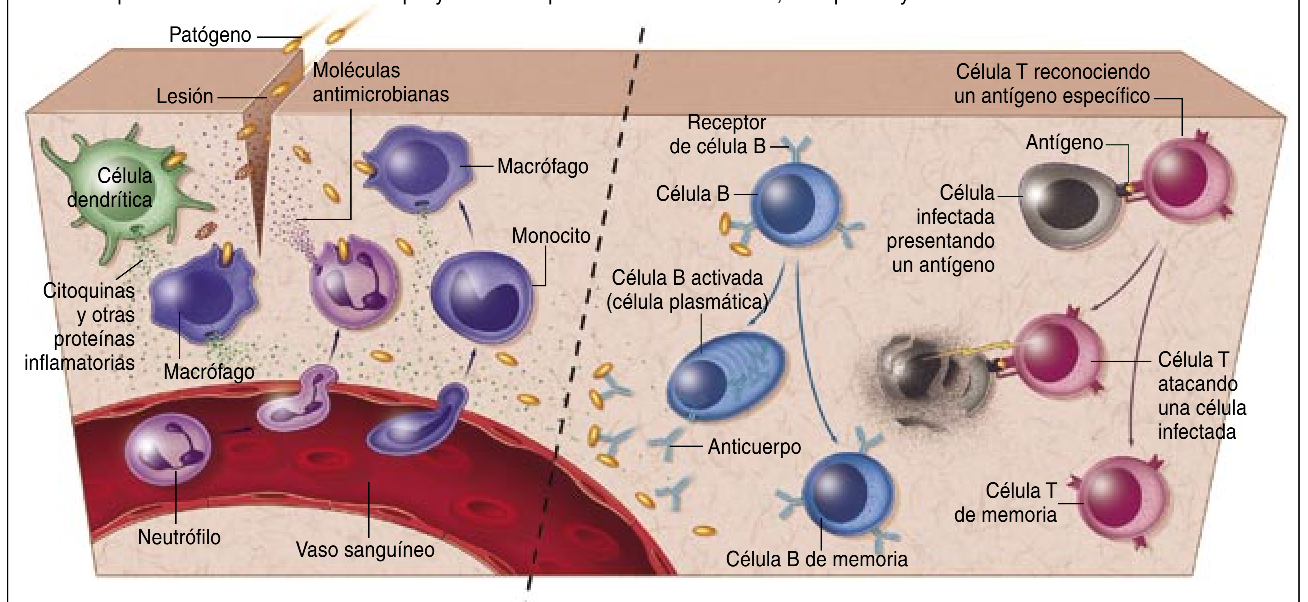
1. EL PRIMER ENCUENTRO con agentes patógenos activa el sistema inmunitario innato, que entraña mayor complejidad de lo que se pensaba.

JAMES SALZANO


11
11

LAS DOS RAMAS DEL SISTEMA INMUNITARIO

El sistema inmunitario de los mamíferos se divide en dos ramas principales. La división innata (*izquierda*) opera cerca de los puntos de entrada en el cuerpo y está siempre alerta. Si ésta no consigue contener el patógeno, la división adaptativa (*derecha*) entra en juego, organizando un ataque más tardío, aunque muy selectivo.



SISTEMA INMUNITARIO INNATO
Este sistema consta de moléculas antimicrobianas y fagocitos (células que ingieren y destruyen patógenos), entre varios componentes. Lo mismo que las células dendríticas y los macrófagos, los fagocitos activan una respuesta inflamatoria, mediante la secreción de citoquinas: proteínas que disparan un aluvión de células defensivas procedentes de la sangre. Con las células reclutadas llegan nuevas dotaciones de fagocitos; sobre todo monocitos (que maduran y se transforman en macrófagos) y neutrófilos.

SISTEMA INMUNITARIO ADAPTATIVO
Las células B y T son las protagonistas de este sistema. Las células B activadas secretan moléculas de anticuerpos que se unen a los antígenos (componentes específicos y exclusivos de un invasor concreto) y destruyen el invasor o lo marcan para que sea atacado por otros. Las células T reconocen los antígenos presentados por otras células. Algunas de ellas ayudan a activar las células B y a otras células T (*no se muestran*); otras atacan directamente a las células infectadas. Las células T y B engendran células "de memoria" que eliminan rápidamente a los invasores reincidentes.

TAMI TOLPA

desencadenan cuando detectan un agente patógeno, ya está empezando a dar frutos: se han identificado posibles dianas para fármacos que podrían potenciar la actividad protectora del cuerpo, reforzar el efecto de las vacunas y tratar una amplia gama de enfermedades devastadoras y potencialmente mortales.

Resumen/Inmunidad innata

- La inmunidad innata constituye un sistema de alerta precoz para detectar y combatir infecciones de cualquier tipo. Está mediada por receptores tipo Toll (TLR), producidos por numerosas células de defensa.
- Cuando los TLR detectan un agente invasor, promueven la producción de una batería de proteínas de señalización que inducen la inflamación y organizan una respuesta inmunitaria completa.
- La hipoactividad de los TLR inutiliza el sistema inmunitario; la hiperactividad de los mismos induce la aparición de artritis reumatoide, enfermedades cardiovasculares y otros trastornos. El control de los TLR o de las proteínas con las que éstos interactúan ofrecería nuevas vías para el tratamiento de enfermedades infecciosas e inflamatorias.

La cenicienta de la inmunología

Un lustro atrás, el interés de los inmunólogos se centraba, casi exclusivamente, en el sistema inmunitario adaptativo. Los libros de texto llenaban sus páginas con detalles sobre las células B (y cómo éstas fabrican los anticuerpos que se unen a proteínas específicas, o antígenos, en la superficie de un patógeno invasor) y las células T (que presentan receptores capaces de reconocer fragmentos de proteínas de patógenos). Se denominaba adaptativa la respuesta porque, durante el curso de una infección, se ajustaba —en función del tipo de agente invasor— para optimizar la acción defensiva.

La inmunidad adaptativa destacaba también por otra particularidad: dota de memoria al sistema inmunitario. Una vez eliminada la infección, siguen presentes las células B y T especialmente entrenadas para prevenir ataques posteriores. En esta capacidad de recordar infecciones pasadas basan su efectividad las vacunas: exponen el cuerpo a formas desactivadas de un patógeno (o partes inofensivas del mismo) para que el sistema inmunitario reaccione como si se tratase de un ataque verdadero, generando células de memoria protec-

toras. Así nos resguardan de enfermedades víricas o bacterianas. Una vez que el organismo se ha enfrentado con un patógeno y ha sobrevivido, las células T y B se encargan de que el mismo microbio no nos vuelva a sorprender desprevenidos.

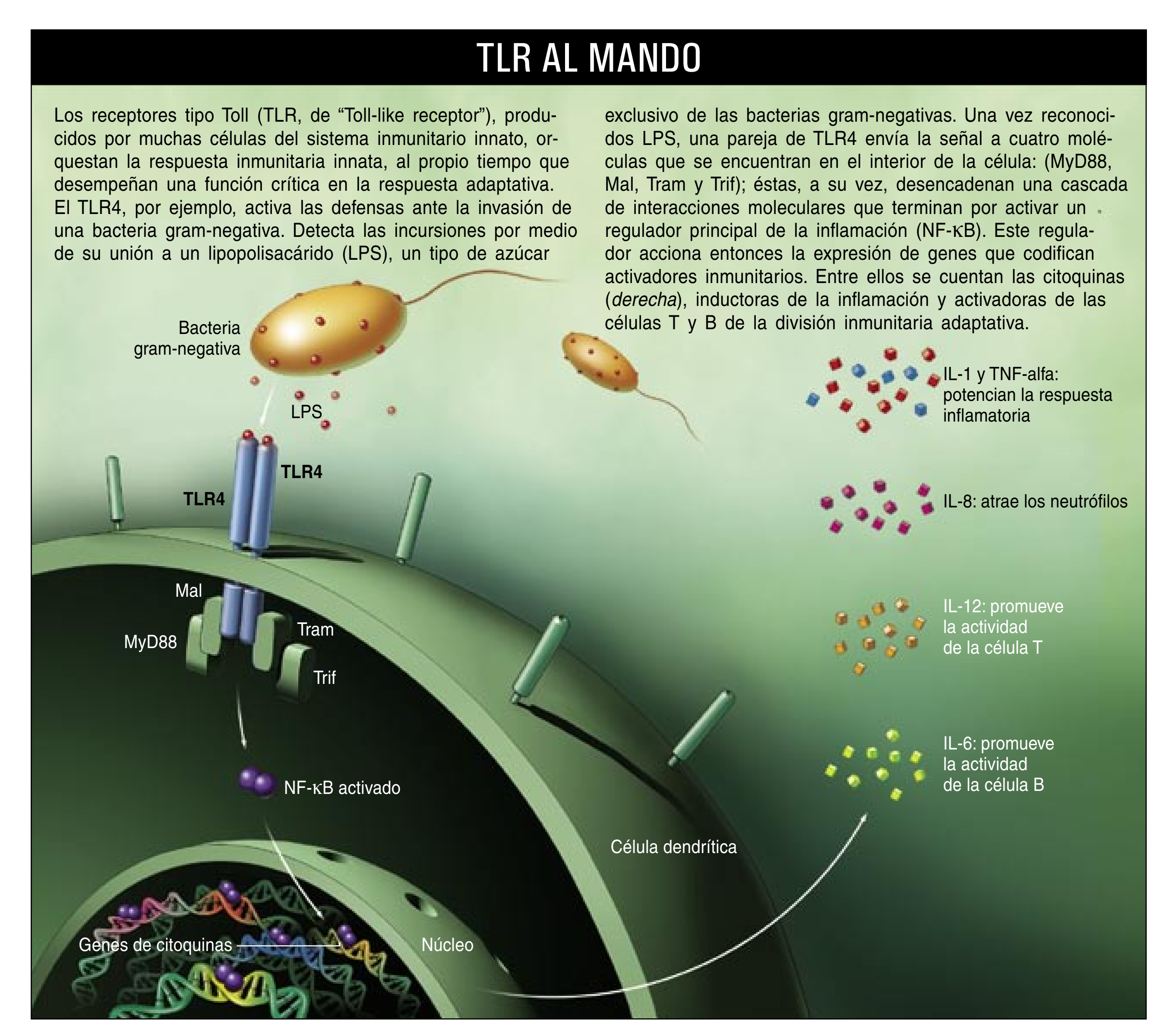
En comparación con el adaptativo, el sistema inmunitario innato parecía bastante primitivo. Por un lado, se pensaba que sus componentes —incluyendo las enzimas antibacterianas de la saliva y un grupo de proteínas interrelacionadas (conocidas en su conjunto como el complemento) que matan las bacterias en el torrente sanguíneo— eran más simples que los anticuerpos dirigidos contra blancos específicos y las células T asesinas. Por otro, su respuesta no muestra capacidad de ajuste.

Sin embargo, al despreciar así la respuesta innata, los inmunólogos eludían un fenómeno de suma importancia, a saber, que este sistema innato, de presumida tosquedad, constituía un elemento esencial para la operatividad del sistema adaptativo. Así es: sin respuesta innata, no hay respuesta adaptativa. El sistema innato produce citoquinas, unas proteínas de señalización que no sólo inducen la inflamación, sino que también activan las células B y T protagonistas de la respuesta adaptativa.

A finales de los años noventa del siglo pasado, el sistema inmunitario adaptativo se conocía con profundidad. Poco se sabía, en cambio, sobre la inmunidad innata. ¿Cómo activaban los microbios la respuesta innata? ¿Cómo dirigía ésta la respuesta adaptativa de las células T y B? Poco después, se descubriría que los TLR —producidos por distintas células inmunitarias— encierran la clave de estas cuestiones. Pero el camino no fue fácil. Para llegar a dichas proteínas, los expertos debieron recorrer un tortuoso y serpenteado viaje a través de estudios del desarrollo de la mosca del vinagre, la búsqueda de drogas para tratar la artritis y el amanecer de la era genómica.

Toll, una proteína misteriosa

La historia de este hallazgo nos retrotrae a los primeros años ochenta, cuando los inmunólogos empezaron a estudiar la actividad molecular de las citoquinas. Estos mensajeros proteicos son producidos por diferentes células inmunitarias: macrófagos y



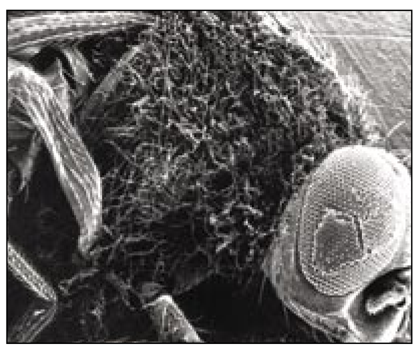
TLR AL MANDO

Los receptores tipo Toll (TLR, de “Toll-like receptor”), producidos por muchas células del sistema inmunitario innato, orquestan la respuesta inmunitaria innata, al propio tiempo que desempeñan una función crítica en la respuesta adaptativa. El TLR4, por ejemplo, activa las defensas ante la invasión de una bacteria gram-negativa. Detecta las incursiones por medio de su unión a un lipopolisacárido (LPS), un tipo de azúcar exclusivo de las bacterias gram-negativas. Una vez reconocidos LPS, una pareja de TLR4 envía la señal a cuatro moléculas que se encuentran en el interior de la célula: (MyD88, Mal, Tram y Trif); éstas, a su vez, desencadenan una cascada de interacciones moleculares que terminan por activar un regulador principal de la inflamación (NF-κB). Este regulador acciona entonces la expresión de genes que codifican activadores inmunitarios. Entre ellos se cuentan las citoquinas (*derecha*), inductoras de la inflamación y activadoras de las células T y B de la división inmunitaria adaptativa.

células dendríticas entre otras. Los macrófagos patrullan por los tejidos del cuerpo en busca de señales de infección. Cuando detectan una proteína extraña, inician la respuesta inflamatoria. Engullen y destruyen el invasor portador de esa proteína y secretan varias citoquinas; algunas de éstas disparan entonces una alarma que recluta otras células al sitio infectado y pone todo el sistema inmunitario en alerta total. Las células dendríticas ingieren los microbios invasores y se dirigen a los nódulos linfáticos, donde presentan fragmentos de las proteínas del patógeno a multitud de células T y liberan citoquinas: una secuencia de operaciones que contribuye a la puesta en marcha de la respuesta inmunitaria adaptativa.

Para estudiar la función de las diferentes citoquinas, los expertos necesitaban hallar una vía inductora de su producción. Observaron que el modo más eficaz para conseguir que los macrófagos y las células dendríticas produjeran citoquinas en el laboratorio era exponerlas a bacterias o, lo que revestía mayor interés, a componentes bacterianos específicos. El lipopolisacárido (LPS), por ejemplo, una molécula que fabrican numerosas bacterias, desencadena una potente respuesta inmunitaria. En humanos, la exposición a LPS causa fiebre y puede provocar un shock séptico, una disfunción vascular mortal debida a una respuesta excesiva y destructiva de las células inmunitarias. Los LPS desencadenan esa respuesta inflamatoria al incitar a los macrófagos y a las células dendríticas a liberar citoquinas: en concreto, el factor de necrosis tumoral-alfa (TNF-alfa) y la interleucina-1 (IL-1).

Se demostró que estas dos citoquinas gobernaban la respuesta inflamatoria mediante la activación de las células inmunitarias. Si se descontrolan, precipitan la aparición, entre otros, de la artritis reumatoide, una enfermedad autoinmune en la que una inflamación excesiva de las articulaciones conduce a la destrucción de las mismas. Los expertos dedujeron entonces que si limitaban los efectos del TNF-alfa y la IL-1 podrían demorar el avance de la enfermedad y aliviar así el sufrimiento de los pacientes artríticos. Pero todavía no estaban en condiciones de diseñar



2. UNA MOSCA DEL VINAGRE que carecía de la proteína Toll muere víctima de una infección por hongos generalizada; las esporas cubren el cuerpo como un abrigo de pieles. (La cabeza se halla abajo a la derecha.) El estudio en cuestión, publicado en 1996, aportó uno de los primeros datos sobre la función protectora que las proteínas Toll desarrollan en la mosca del vinagre.

BRUNO LEMAITRE, EMMANUELLE NICOLAS, LYDIA MICHAUT, JEAN-MARC REICHHART Y JULES A. HOFFMANN EN *CELL*, VOL. 86, N.º 6, PAGS. 973-983; 20 DE SEPTIEMBRE DE 1996

dicha terapia; necesitaban conocer mejor el mecanismo de operación de estas moléculas. Para empezar, debían identificar las proteínas con las que interactuaban.

En 1988, John E. Sims y su equipo de Immunex, en Seattle, descubrieron una proteína receptora que reconoce la IL-1. Este receptor reside en las membranas de células muy dispares, incluidos los macrófagos y las células dendríticas. La fracción de receptor que sobresale de la célula se une a la IL-1, mientras que el segmento que permanece en el interior transmite el mensaje de que IL-1 ha sido detectada. Sims examinó con detalle la parte interna del receptor de la IL-1, con la esperanza de hallar alguna pista sobre dicha transmisión: por ejemplo, qué moléculas de señalización activa la proteína en el interior de las células. Pero se llevó una buena sorpresa: el dominio interno del receptor de la IL-1 humana no guardaba semejanza con nada que hubiese visto antes.

En 1991, Nick J. Gay, de la Universidad de Cambridge, hizo un extraño descubrimiento mientras buscaba proteínas similares a Toll, una proteína de la mosca del vinagre. Toll había sido identificada por Christiane Nusslein-Volhard en Tubinga, quien bautizó así a la proteína porque las moscas que carecen de ella muestran un aspecto extraño (*Toll* significa "extraño" en alemán). La proteína ayuda al embrión en desarrollo de *Drosophila* a distinguir entre la parte dorsal y la ventral; por ello las moscas que carecen de Toll parecen en total confusión, como si hubiesen perdido la lateralidad.

Gay consultó la base de datos que contenía todas las secuencias génicas conocidas entonces, en su búsqueda de genes cuyas secuencias mostrasen máxima coincidencia con la de Toll, suponiendo que éstos podrían codificar proteínas similares a aquélla. Descubrió que parte de la proteína Toll guarda una sorprendente semejanza con el dominio interno del receptor humano para la IL-1, precisamente el mismo segmento que tanto había desconcertado a Sims.

Aquellos resultados parecían carecer de sentido. ¿Por qué una proteína implicada en la inflamación en humanos se parecería a una proteína que les dice a los embriones de la mosca cuál es la parte de arriba? El misterio permaneció sin resolver hasta que, en 1996, Jules A. Hoffmann y sus colaboradores del CNRS en Estrasburgo demostraron que las moscas se servían de Toll para defenderse de infecciones fúngicas. En *Drosophila*, pues, Toll es multifuncional: participa en el desarrollo embrionario y en la inmunidad del adulto.

Receptores tipo Toll

El receptor para la IL-1 y la proteína Toll guardan semejanza sólo en los segmentos que se ocultan en el interior de la célula; los que están expuestos al exterior parecen bastante diferentes. Esta observación llevó a los expertos a buscar proteínas humanas idénticas a Toll. Después de todo, la evolución suele conservar los diseños eficaces; si Toll mediaba la inmunidad en las moscas, quizá proteínas similares estaban haciendo lo propio en humanos.

Siguiendo el consejo de Hoffmann, en 1997, Ruslan Medzhitov y el desaparecido Charles A. Janeway, Jr., de la Universidad de Yale, hallaron la primera de estas proteínas, a la que llamaron Toll humana. En unos seis meses, Fernando Bazán y sus compañeros de DNAX, en Palo Alto, habían identificado cinco Toll humanas: se denominarían receptores tipo Toll (TLR). Uno de ellos, el TLR4, coin-

cidía con la Toll humana descrita por Medzhitov y Janeway.

Llegados a este punto, todavía no se sabía con exactitud cómo podrían contribuir los TLR a la inmunidad humana. Janeway había observado que llenar las membranas de las células dendríticas con TLR4 incitaba la producción de citoquinas. Sin embargo, no logró explicar cómo se activaba el TLR4 en una infección.

La respuesta llegó en 1998, cuando Bruce Beutler y su equipo del Instituto Scripps en La Jolla descubrieron ratones mutantes incapaces de responder a los LPS: portaban una versión defectuosa de TLR4. Mientras que los ratones normales morían de sepsis dentro de la hora posterior a ser inyectados con LPS, los mutantes sobrevivían y se comportaban como si no hubieran estado expuestos a la molécula. Es decir, la mutación en el gen del TLR4 insensibilizaba a los ratones frente a los LPS.

Aquellos resultados indicaban que el TLR4 se activa cuando interactúa con un LPS. De hecho, ahora sabemos que su función consiste en detectar los LPS. El hallazgo arrojó luz sobre la comprensión de la sepsis, pues reveló el mecanismo molecular que subyace tras la inflamación y suministró un posible blanco para su tratamiento. En dos años, los expertos determinaron que la mayoría de los TLR —una decena de los cuales se ha identificado ya en humanos— reconocen moléculas básicas para la supervivencia de bacterias, virus, hongos y parásitos. El TLR2 se une al ácido lipoteicoico, un componente de la pared bacteriana; el TLR3 reconoce el material genético de los virus; el TLR5 reconoce la flagelina, una proteína que forma el flagelo que las bacterias usan para desplazarse; y el TLR9 reconoce una secuencia génica distintiva llamada CpG, que se encuentra en bacterias y virus en una forma cuya estructura química difiere de las secuencias CpG en mamíferos.

Resulta evidente, pues, que los TLR evolucionaron para reconocer y responder ante componentes moleculares básicos de los patógenos. Ello impide que un agente infeccioso eluda los TLR mediante la eliminación o alteración química de cualquiera de estos componentes, para pasar inadvertido; al ser fundamentales, terminaría por inutilizarse. Además, dado que muchos elementos de éstos se comparten entre diversos organismos, bastan sólo unos 10 TLR para protegernos virtualmente de cualquier patógeno conocido.

La inmunidad innata no es exclusiva de los humanos. De hecho, se trata de un sistema ancestral. Disponen de respuesta inmunitaria innata las moscas, las estrellas de mar, las pulgas de agua y casi todos los organismos estudiados hasta ahora. Muchos usan los TLR como desencadenantes. Los nemátodos, por ejemplo, se sirven de un TLR para detectar las bacterias infecciosas y escapar de ellas nadando. Los TLR abundan también en las plantas: el tabaco requiere la proteína N para combatir el virus del mosaico del

FUNCIONES DE LOS RECEPTORES TIPO TOLL

Cada receptor tipo Toll detecta algún componente esencial de una amplia gama de patógenos; en su conjunto, los TLR reconocen casi todos los invasores que podrían causar enfermedad. Cada tipo de célula encierra una combinación diferente de estos receptores, que operan por pares. Se han identificado diez TLR humanos y un gran número de las moléculas que éstos reconocen (*abajo*). Se desconocen aún las funciones de TLR10 así como la pareja de TLR3, TLR5, TLR7, TLR8 y TLR9.

TAMI TOLPA

tabaco. *Arabidopsis thaliana* cuenta con más de 200.

La primera proteína tipo Toll debió surgir en un organismo unicelular, antepasado común de plantas y animales. Puede incluso que estas moléculas facilitaran nuestra evolución. Sin un sistema de defensa eficaz contra la infección, quizá los organismos multicelulares jamás hubieran sobrevivido.

Asalto al castillo

El sistema inmunitario innato se comparaba antaño, debido a su supuesta simplicidad, con la muralla de un castillo. Se pensaba que la acción defensiva tenía lugar una vez que en la muralla se abría una brecha y las tropas que estaban dentro —las células T y B— entraban en batalla. Ahora sabemos que en la muralla del castillo se aposentan centinelas (TLR) que identifican al invasor y tocan a rebato para movilizar a las tropas y preparar las defensas contra el atacante. En otras palabras, los TLR disparan ambos sistemas: el innato y el adaptativo.

La escena podría describirse como sigue. Cuando un patógeno entra por primera vez en el cuerpo, uno o varios TLR (como los que se encuentran en la superficie de los macrófagos y células dendríticas que patrullan sin cesar) se unen a las moléculas extrañas; por ejemplo, los LPS de las bacterias gram-negativas. A continuación, los TLR incitan a las células a liberar varias citoquinas. Estos mensajeros proteicos reclutan entonces macrófagos adicionales, células dendríticas y otras células inmunitarias para aislar y atacar (sin especificidad) el microorganismo intruso. Al propio tiempo, las citoquinas liberadas por esas células causan fiebre, dolor corporal y otros síntomas de tipo gripal.

Los macrófagos y las células dendríticas que han troceado el agente invasor muestran fragmentos del mismo en su superficie, junto con otras moléculas para avisar de la presencia del patógeno. Esta exhibición, en combinación con las citoquinas liberadas en respuesta a los TLR, activa por fin las células B y T, que identifican dichos fragmentos. Ello provoca —en el curso de varios días— que esas células proliferen y dirijan un ataque violento y polarizado contra el invasor. Sin el efecto cebador de los TLR, las células B y T no se activarían y el organismo no sería capaz de organizar una respuesta inmunitaria completa ni recordar infecciones previas.

Tras la infección inicial, se reserva una cantidad suficiente de células T y B de memoria para que el cuerpo pueda enfrentarse al invasor con mayor eficacia en el caso de que éste regrese. En ocasiones, este ejército de células de memoria opera con tal prontitud que no llega a producirse ninguna inflamación. Ello hace que la víctima no se encuentre tan mal; puede incluso que ni siquiera note la reinfección.

La inmunidad innata y la adaptativa forman parte del mismo sistema de reconocimiento y eliminación de patógenos. La interacción entre estos dos mecanismos de defensa es lo que confiere robustez al sistema inmunitario en su conjunto.

Respuesta "personalizada"

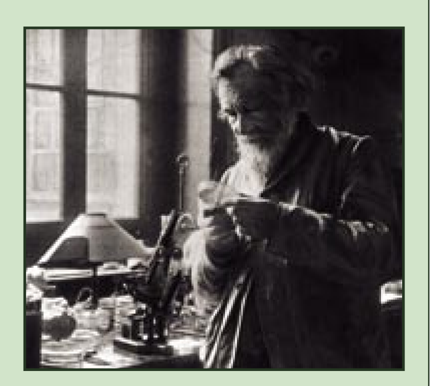
Para lograr un conocimiento más pleno del control operado por los TLR sobre la actividad inmunitaria, se precisa identificar las moléculas que transmiten señales desde los TLR activados en la superficie celular hasta el núcleo, induciendo la expresión de genes que codifican citoquinas y otros activadores inmunitarios. Objeto de intensa investigación, han comenzado a aflorar los primeros hallazgos.

Sabemos ahora que los TLR, lo mismo que un gran número de receptores que residen en la superficie celular, reclutan una larga cadena de proteínas de señalización que llevan su mensaje al núcleo; a la manera de una brigada que transporta cubos de agua hasta un incendio. Salvo el TLR3, todos los TLR transfieren su señal a MyD88, una proteína adaptadora. Qué otras proteínas participen en la transmisión de la señal dependerá del TLR. En mi laboratorio estudiamos Mal, una proteína que ayuda a portar señales generadas por TLR4 y TLR2. El TLR4 también requiere de otras dos proteínas (Tram y Trif), para enviar la señal, mientras que el TLR3 sólo necesita de Trif. Shizuo Akira, de la Universidad de Osaka, ha demostrado que ratones transgénicos que no sintetizan algunas de estas proteínas de señalización intermediarias tampoco responden a los productos microbianos; ello sugiere que las proteínas asociadas a los TLR podrían constituir las dianas para nuevos fármacos antiinflamatorios o antimicrobianos.

La interacción con diferentes grupos de proteínas de señalización permite a los TLR activar varios grupos de genes que afinan la respuesta de la célula en función del tipo de patógeno. Por ejemplo, TLR3 y TLR7

LAS PULGAS DE MECHNIKOV

El descubrimiento de las proteínas Toll y los receptores tipo Toll retoma una línea de investigación iniciada hace más de un siglo por Ilya Mechnikov, descubridor de los fundamentos de la inmunidad innata. A principios de los años ochenta del siglo XIX, Mechnikov arrancó algunas espinas de un mandarino y las clavó en una larva de estrella de mar. A la mañana siguiente, las espinas estaban rodeadas por células móviles; supuso que éstas trataban de engullir las bacterias que, junto con otros cuerpos extraños, habían sido introducidas allí por las espinas. Observó entonces que pulgas de agua (*Daphnia*) expuestas a esporas de hongos organizaban una respuesta similar. Descubrió así la fagocitosis, la piedra angular de la inmunidad innata. El hallazgo le valió a Mechnikov un premio Nobel en 1908.



MECHNIKOV era todo un personaje. Refiriéndose a los tiempos en que trabajaba en el Instituto Pasteur, se cuenta de él que calzaba botas de goma en cualquier época del año. Llevaba un paraguas y los bolsillos llenos a reventar de publicaciones científicas. Lucía siempre el mismo sombrero; a menudo, cuando estaba exaltado, se sentaba en él.

HULTON ARCHIVE/GETTY IMAGES

detectan la presencia de virus; acto seguido, desencadenan una cascada de interacciones moleculares que inducen la producción y liberación de interferón, la más importante citoquina antiviral. El TLR2, que detecta bacterias, estimula la liberación de una mezcla de citoquinas que, si bien no incluye el interferón, resulta más apropiada para combatir un ataque bacteriano.

El descubrimiento de la especificidad de los TLR —capaces de detectar diferentes productos microbianos y ayudar a confeccionar la respuesta inmunitaria más adecuada— mina la hipótesis, largo tiempo admitida, según la cual la inmunidad innata constituiría una barrera estática e incapaz de discriminar. La verdad es que nos hallamos ante un sistema dinámico que gobierna casi todos los aspectos de la inflamación y la inmunidad.

NUEVAS DIANAS FARMACOLOGICAS

Sustancias que activaran los TLR y, por tanto, potenciaran la respuesta inmunitaria mejorarían la eficacia de vacunas y protegerían contra la infección. Podrían incluso orientar el sistema inmunitario hacia la destrucción de tumores. En cambio, los fármacos que bloquearan la actividad de los TLR, resultarían útiles para tratar trastornos inflamatorios. Se está investigando en ambos tipos de medicación (*abajo*).

TIPO DE FARMACO	EJEMPLOS
Activador de TLR4	MPL: tratamiento de la alergia y coadyuvante (activador del sistema inmune) para vacunas de Corixa (Seattle). Se ha sometido a ensayos clínicos a gran escala
Activador de TLR7	ANA245 (isatoribina): agente antiviral de Anadys (San Diego). Han empezado las primeras fases de su ensayo en humanos para hepatitis C
Activador de TLR7 y TLR8	Imiquimod: tratamiento para verrugas genitales, carcinoma de células basales y queratosis actínica, de 3M (St. Paul, Minnesota). Se encuentra ya en el mercado
Activador de TLR9	ProMune: coadyuvante para vacunas y tratamiento para el melanoma y el linfoma no de Hodgkin, de Coley (Wellesley, Massachusetts). Se ha sometido a ensayos clínicos a gran escala
Inhibidor de TLR4	E5564: antiséptico de Eisai (Teaneck, Nueva Jersey). Han empezado las primeras fases de su ensayo en humanos
Inhibidor general de TLR	RDP58: medicamento para la colitis ulcerosa y la enfermedad de Crohn, de Genzyme (Cambridge, Massachusetts). Se ha sometido a ensayos clínicos a gran escala
Inhibidor general de TLR	OPN201: medicina para trastornos autoinmunes, de Opsona Therapeutics (Dublín). Se está ensayando en modelos animales de inflamación

De la *Legionella* al lupus

Tras reconocer el papel central que desempeñan los TLR en la activación de la respuesta inmunitaria, se empezó a sospechar que las versiones deficientes y las hiperactivas de estos receptores podrían acarrear trastornos en el sistema de defensa. Se andaba en lo cierto. Ciertos defectos en la inmunidad innata conducen a una mayor susceptibilidad a los virus y a las bacterias. En las personas con una forma de TLR4 hipoactiva, la probabilidad de sufrir infecciones bacterianas severas, en el transcurso de un período de cinco años, quintuplica la probabilidad de padecerlas quienes portan un TLR4 normal. Las personas que mueren de legionelosis presentan a menudo una mutación en TLR5 que incapacita la proteína, comprometiendo así la respuesta inmunitaria innata y dejándolos a merced de la bacteria *Legionella*.

Una respuesta inmunitaria exagerada puede resultar igualmente destructiva. Sólo en los EE.UU. y Europa, más de 400.000 personas mueren cada año de sepsis, provocada por una respuesta inmunitaria hiperactiva capitaneada por la TLR4.

Otros estudios señalan la participación de los TLR en el lupus eritematoso sistémico, la artritis reumatoide y otras enfermedades autoinmunes. En estos casos, podría ser que los TLR respondieran a productos procedentes de células dañadas, propagando una respuesta inflamatoria inapropiada y promoviendo una reacción errónea del sistema inmunitario adaptativo. En el ejemplo del lupus, se ha observado que el TLR9 reacciona ante el ADN del propio organismo.

La inmunidad innata y los TLR podrían estar relacionados también en la enfermedad cardíaca. Las personas con una mutación en TLR4 parecen ser menos propensas a desarrollar trastornos cardiovasculares. Puesto que la inflamación contribuye a la formación de las placas que atascan las arterias coronarias, una forma de proteger el corazón consistiría en acallar el TLR4. La manipulación del TLR4, pues, podría abrir una nueva vía para prevenir o limitar esta enfermedad.

Equilibrio de fuerzas

Los laboratorios farmacéuticos están interesados en los TLR y sus proteínas de señalización asociadas; podrían operar como dianas farmacológicas en el tratamiento de infecciones y trastornos inmunitarios. Con la expansión de la resistencia a los antibióticos, la emergencia de virus nuevos y más virulentos y la creciente amenaza bioterrorista, la necesidad de desarrollar nuevos tratamientos que ayuden a nuestro organismo a luchar contra la infección se está haciendo cada vez más perentoria.

El estudio de los TLR guiaría, por ejemplo, el desarrollo de vacunas que ofrecieran mayor seguridad y eficacia. En su mayoría, las vacunas dependen de la inclusión de un coadyuvante, una sustancia que inicia la respuesta inflamatoria, que a su vez impulsa la capacidad del sistema adaptativo para generar células de memoria. En la actualidad, las vacunas suelen utilizar un coadyuvante que, si bien no provoca una respuesta adaptativa completa, prima las células B sobre las T. Para potenciar esta respuesta, varias compañías se han fijado en compuestos que activan el

TLR9, un receptor que reconoce un repertorio muy amplio de bacterias y virus, y, por tanto, conduce al despliegue de una respuesta inmunitaria más enérgica.

Conocer la actividad de los TLR nos permite afrontar mejor la amenaza bioterrorista. El virus de la viruela, que acalla los TLR evitando así su detección y eliminación, constituye una arma biológica potencial. En colaboración con Geoffrey L. Smith, del Colegio Imperial de Londres, en mi laboratorio descubrimos que eliminando la proteína vírica que inutiliza los TLR, se generaba un virus debilitado a partir del cual podría obtenerse una vacuna inocua.

Armados con una mayor comprensión de los TLR y la inmunidad innata, los médicos podrían predecir qué pacientes tolerarían peor una infección y aplicarles tratamientos más agresivos. Si alguien llegara al hospital con una infección bacteriana y resultase tener, por ejemplo, un TLR4 mutante, se le podrían suministrar antibióticos o agentes que reforzaran su respuesta inmunitaria para prevenir que la infección causara mayor daño.

El objetivo es estimular una respuesta inmunitaria equilibrada: suficiente para eliminar un patógeno, sin que precipite una reacción inflamatoria que aporte más daño que beneficio. En ese sentido, cualquier tratamiento médico que pretenda aliviar la inflamación mediante la represión de la actividad de los TLR y la liberación de citoquinas no debe, al propio tiempo, socavar las defensas contra la infección.

Los fármacos antiinflamatorios que se interponen a la acción de TNF-alfa, una de las citoquinas que se producen como resultado de la activación de TLR4, ofrecen un ejemplo de la fragilidad de este equilibrio. Los TNF-alfa sintetizados durante la infección e inflamación se acumulan en las articulaciones de pacientes con artritis reumatoide. Los antiinflamatorios, pues, alivian la artritis. Sin embargo, algunos de los pacientes que los toman terminan con tuberculosis. Ocurre que al detener la respuesta inflamatoria se amortiguan también las respuestas patógeno-específicas, dejando vía libre a la bacteria que, probablemente, se hallaba en estado latente.

En resumen, los TLR vendrían a operar como el mando que controla el volumen de un aparato estéreo, estableciendo un equilibrio entre la inmunidad adaptativa y la inflamación. Se buscan ahora métodos para manipular este control, de forma que se pueda reducir la inflamación sin perjudicar el sistema inmunitario.

Teniendo en cuenta que los TLR se descubrieron hace sólo siete años, son notables los progresos que se han llevado a cabo en la comprensión del papel central que estas proteínas desarrollan en la primera línea de defensa del organismo. La inmunidad innata, cubierta largo tiempo por el velo del olvido, se ha convertido de pronto en el centro de atención.

El autor

Luke A. J. O'Neill obtuvo el doctorado en farmacología por la Universidad de Londres en 1985 con una tesis sobre la citoquina proinflamatoria interleucina-1. Desarrolla su labor investigadora en la Fundación irlandesa para la Ciencia y dirige el departamento de bioquímica del Trinity College en Dublín. Fundó la compañía farmacéutica dublinesa Opsona Therapeutics.

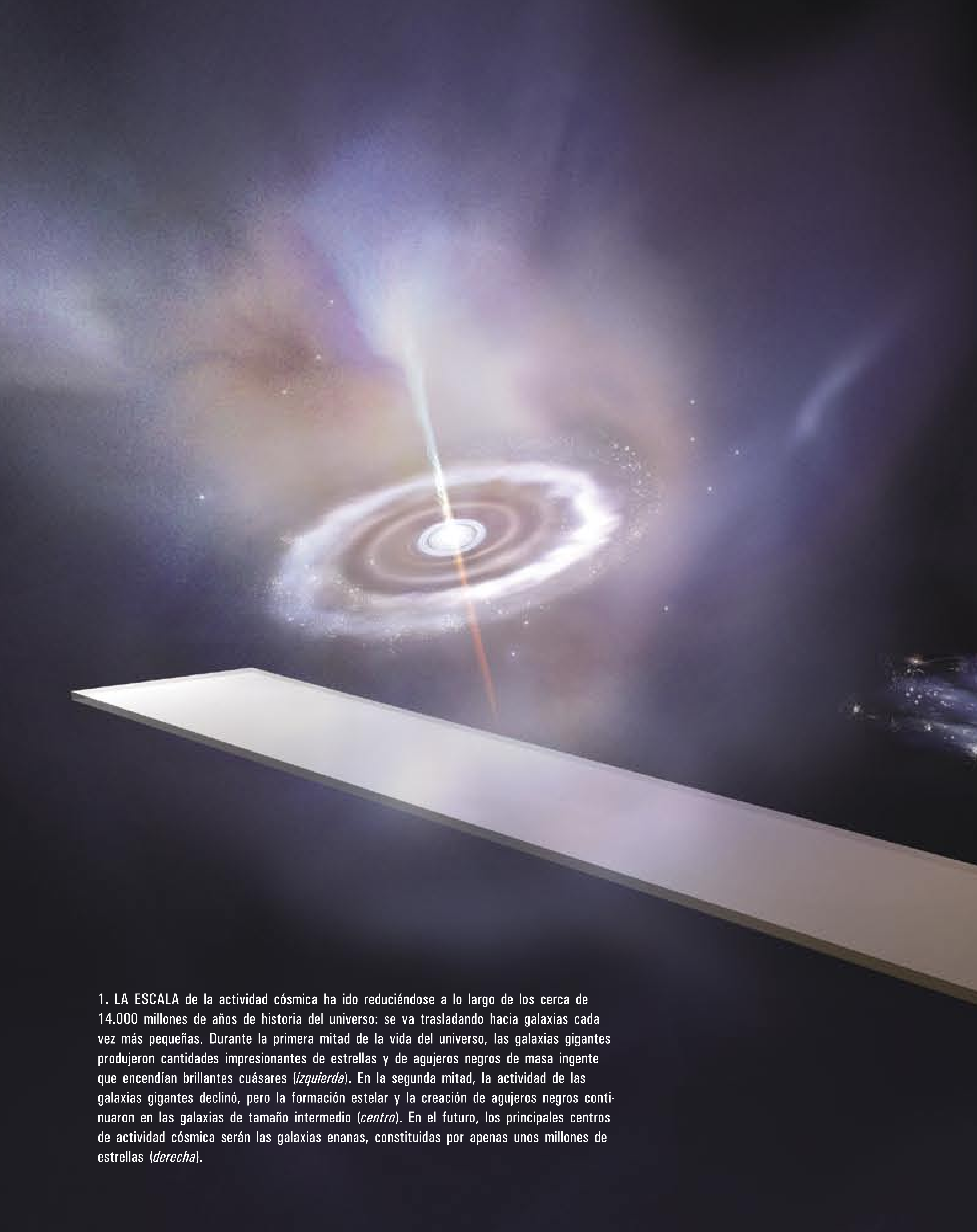
Bibliografía complementaria

INNATE IMMUNITY. Ruslan Medzhitov y Charles Janeway en *New England Journal of Medicine*, vol. 343, n.º 5, págs. 338-344; 3 de agosto, 2000.

INFERENCES, QUESTIONS AND POSSIBILITIES IN TOLL-LIKE RECEPTOR SIGNALING. Bruce Beutler en *Nature*, vol. 430, págs. 257-263; 8 de julio, 2004.

TOLL-LIKE RECEPTOR CONTROL OF THE ADAPTIVE IMMUNE RESPONSES. Akiko Iwasaki y Ruslan Medzhitov en *Nature Immunology*, vol. 5, n.º 10, págs. 987-995; octubre 2004.

TLRS: PROFESSOR MECHNIKOV, SIT ON YOUR HAT. L. A. J. O'Neill en *Trends in Immunology*, vol. 25, n.º 12, págs. 687-693; diciembre, 2004.

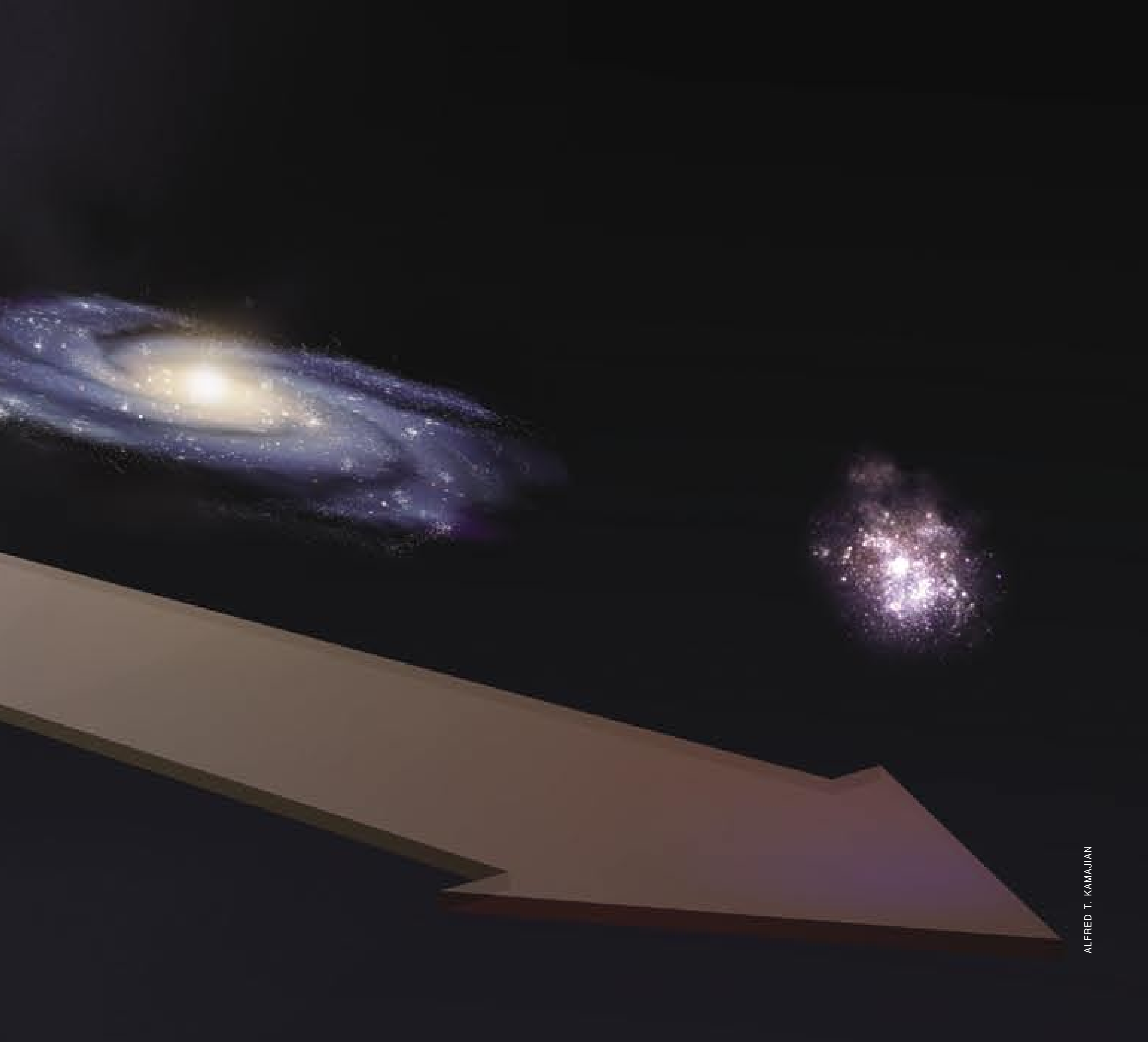


1. LA ESCALA de la actividad cósmica ha ido reduciéndose a lo largo de los cerca de 14.000 millones de años de historia del universo: se va trasladando hacia galaxias cada vez más pequeñas. Durante la primera mitad de la vida del universo, las galaxias gigantes produjeron cantidades impresionantes de estrellas y de agujeros negros de masa ingente que encendían brillantes cuásares (*izquierda*). En la segunda mitad, la actividad de las galaxias gigantes declinó, pero la formación estelar y la creación de agujeros negros continuaron en las galaxias de tamaño intermedio (*centro*). En el futuro, los principales centros de actividad cósmica serán las galaxias enanas, constituidas por apenas unos millones de estrellas (*derecha*).

El universo maduro

El universo ha perdido la actividad que llegó a desarrollar, pero aún forma estrellas y crea agujeros negros a buen ritmo

Amy J. Barger



ALFRED T. KAMAJIAN

Hasta hace poco, la mayoría de los astrónomos pensaba que el universo había entrado en una madurez aburrida. Fuegos cósmicos agitaron sus primeros seis mil millones de años: las galaxias chocaban entre sí y se fundían en otras mayores, poderosos agujeros negros succionaban gigantescas espirales de gas y las estrellas se formaban con una profusión monumental. Durante los siguientes ocho mil millones de años, en cambio, había habido cada vez menos colisiones galácticas, los descomunales agujeros negros se habían calmado y la formación estelar se había reducido a casi nada. A pocos les quedaba alguna duda de que estábamos presenciando el final de la historia cósmica y de que el futuro no conocería sino la incesante expansión de un universo apacible y envejecido.

Sin embargo, las observaciones de los últimos años demuestran con claridad que se había exagerado la senectud del universo. Gracias a los observatorios espaciales y la instalación de instrumentos de nuevo cuño en los telescopios terrestres, se ha descubierto que en el pasado reciente sí ha habido procesos enérgicos en las galaxias cercanas. (La luz de las galaxias lejanas necesita más tiempo para alcanzarnos; las observamos, pues, en un estadio más temprano de su evolución.) El análisis de los rayos X emitidos por los núcleos de galaxias no muy lejanas ha descubierto agujeros negros de masa muy grande que siguen absorbiendo el gas y el polvo de sus alrededores. Y un estudio profundo de la luz emitida por galaxias de edades variadas ha descubierto que el ritmo de formación estelar no ha declinado tanto como se pensaba.

Hoy se tiende a creer que en los primeros millares de millones de años la actividad se concentraba en un pequeño número de galaxias gigantes, donde ocurrían prodigiosos brotes de formación estelar y que contaban con agujeros negros colosales en su centro. Ahora la actividad se dispersa más; la creación de estrellas y la agregación de material en los agujeros negros se reparte por un gran número de galaxias de tamaño mediano o pequeño. Estamos en medio de un cambio de escala de la actividad cósmica.

Imágenes de campo profundo

Antes de compilar una historia del cosmos, primero hay que entender la sorprendente diversidad de los objetos que encontramos en él. Las imágenes ópticas más sensibles proceden del Telescopio Espacial Hubble. Gracias a sus estudios "de campo profundo" —exposiciones a lo largo de diez días de dos regiones diminutas del cielo observadas a través de cuatros filtros de sendas longitudes de onda—, se han hallado miles de galaxias lejanas, la más antigua sólo mil millones de años posterior a la gran explosión. Un estudio muy reciente, de "campo ultraprofundo", ha mostrado galaxias aún más jóvenes —jóvenes cuando la luz que ahora les vemos salió de ellas—. No obstante, la obtención de estas imágenes de campo profundo es sólo el principio. Se quiere saber cómo evolucionaron los objetos cercanos en el tiempo a la gran explosión hasta convertirse en las galaxias que conocemos actualmente. Ligar presente y pasado es uno de los asuntos principales para la astronomía actual.

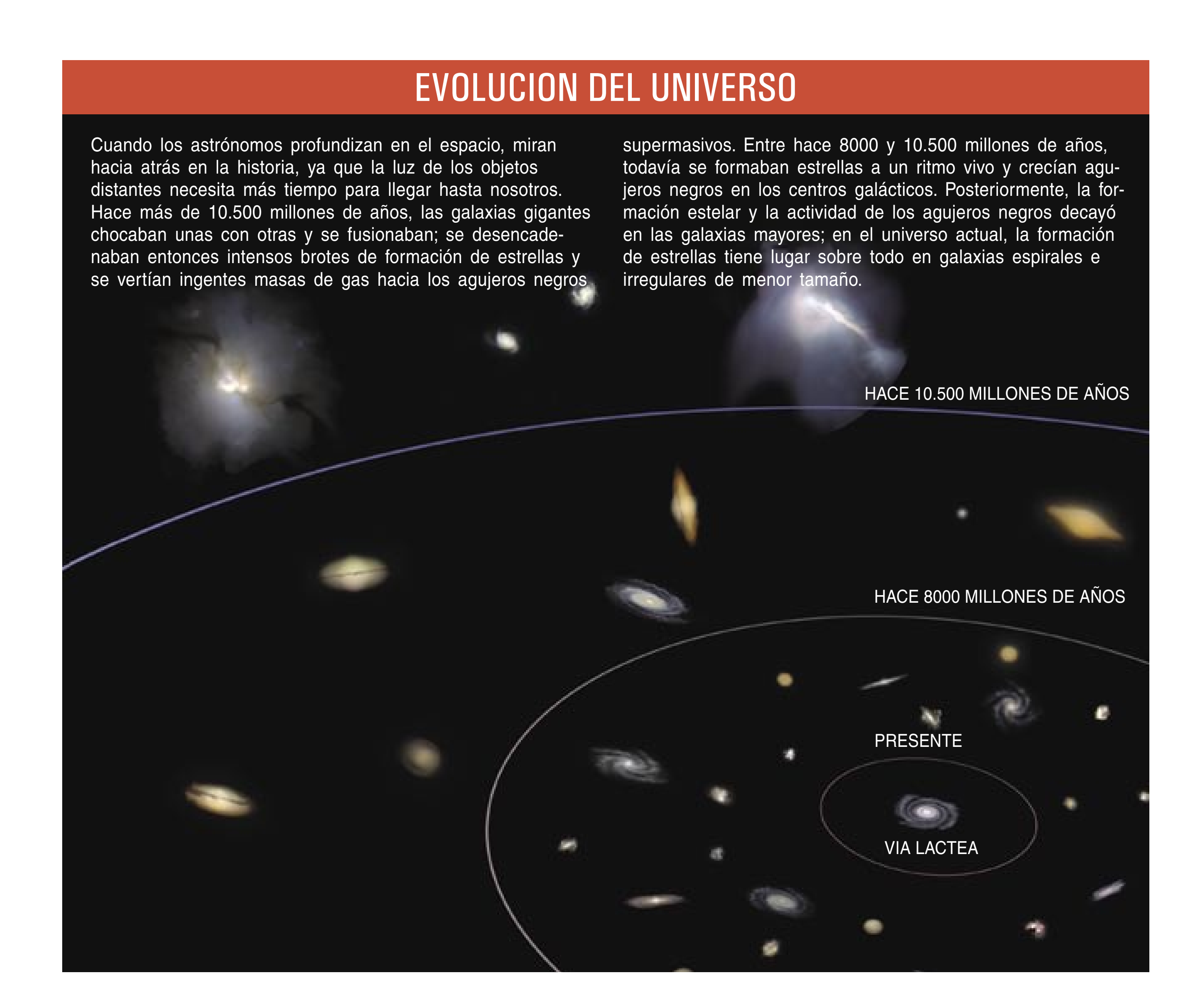
Un paso importante hacia ese objetivo: determinar la estratigrafía cósmica de los miles de galaxias que llenan una imagen de campo profundo; es decir, establecer qué objetos están por delante en la imagen y cuáles distan más de nosotros. Para ello se mide el corrimiento al rojo del espectro de esas galaxias. La expansión del universo dilata la luz de las fuentes más lejanas; su longitud de onda se ha desplazado hacia la cola roja del espectro. Cuanto más desplazada esté al rojo la luz, más remoto será el momento en que se emitió y más lejana la fuente. Con un corrimiento al rojo igual a uno, la longitud de onda se dilata un cien por cien (se duplica); una luz que presente ese desplazamiento se habrá emitido unos seis mil millones de años tras la gran explosión, menos de la mitad de la edad actual del universo. Los astrónomos suelen referirse más a los desplazamientos al rojo que a las edades, porque el corrimiento es lo que miden directamente.

Los desplazamientos al rojo encierran en sí la reconstrucción de la historia cósmica, pero resulta casi imposible medírselos a todas las galaxias presentes en lo más profundo de un campo. Una de las razones es lo abultado de su número. Pero el problema fundamental reside en la debilidad intrínseca de algunas galaxias. La luz de los objetos más débiles llega con suma parsimonia, a un ritmo de tan sólo un fotón por minuto y por centímetro cuadrado. Y cuando se toma su espectro, la red de difracción del espectrógrafo dispersa la luz sobre un área grande, debilitando aún más la señal en cada longitud de onda.

A finales de la década de 1980, un equipo dirigido por Lennox L. Cowie, del Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawai, y por Simon J. Lilly, ahora en el Instituto Federal Tecnológico de Zúrich, desarrolló un método novedoso que evitaba las laboriosas observaciones del corrimiento al rojo. Tomaron datos de varias regiones del cielo con unos filtros que seleccionaban bandas espectrales estrechas, centradas en longitudes de onda ultravioletas, verdes y rojas, y midieron

Resumen/El cosmos de edad media

- Los primeros miles de millones de años del universo conocieron choques de galaxias, gigantescos brotes de formación estelar y agujeros negros con la masa de miles de millones de soles. El declive de la actividad cósmica desde entonces ha llevado a pensar que los días gloriosos del universo pasaron hace ya mucho.
- Recientemente, sin embargo, se han hallado potentes agujeros negros que devoran el gas de muchas galaxias cercanas. Las nuevas observaciones indican también que el ritmo de formación estelar no ha declinado tanto como se creía.
- Los resultados apuntan a una reducción de escala de la actividad cósmica: dominaban el universo temprano galaxias gigantes, en un número no muy grande; ahora, la actividad se ha repartido entre un número extenso de galaxias menores.

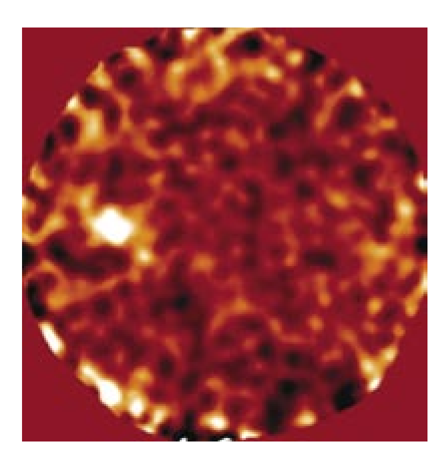


ALFRED T. KAMAJIAN

el brillo de las galaxias en cada una de esas bandas (*véase el recuadro* "Así se descubren galaxias primitivas"). Una galaxia cercana donde se estén formando estrellas presentará el mismo brillo en los tres filtros. La luz intrínseca de una galaxia con formación estelar exhibe un corte abrupto justo después de la banda ultravioleta, a la longitud de onda de 912 angstrom. (Ese corte se debe a que el hidrógeno neutro gaseoso existente dentro y alrededor de la galaxia absorbe la radiación a longitudes de onda menores.) Como la luz de las galaxias lejanas está desplazada al rojo, el corte también se mueve hacia mayores longitudes de onda; si el desplazamiento es grande, no aparecerá luz de la galaxia en el filtro ultravioleta, y si es aún mayor, tampoco se percibirá en el filtro verde.

De esta forma, Cowie y Lilly agruparon las galaxias donde se originaban estrellas en diversos anchos intervalos de corrimiento al rojo. Proporcionaron así una idea general de las edades. En 1996 Charles C. Steidel, del Instituto Tecnológico de California, y sus colaboradores aplicaron este método a cientos de galaxias remotas en las que se producía formación estelar (su desplazamiento al rojo era de alrededor de tres; su luz nos las mostraba como fueron unos dos mil millones de años después de la gran explosión). Muchos desplazamientos al rojo deducidos fotométricamente se confirmaron mediante los correspondientes espectros de las galaxias, tomados con el poderoso telescopio Keck de 10 metros, instalado en Mauna Kea, Hawai.

Una vez conocidos los desplazamientos al rojo de las galaxias, se puede emprender la reconstrucción de la historia de la formación estelar. Gracias a la observación de galaxias cercanas sabemos que, a la vez, se crea un número pequeño de estrellas de gran masa y numerosísimas estrellas de masa pequeña. Por cada 20 estrellas de tipo solar, nace sólo una estrella cuya masa decuplique la solar. Las estrellas de masa grande emiten luz ultravioleta y azul, mientras que las pequeñas despiden sobre todo luz amarilla y roja. En cuanto se conoce el corrimiento al rojo de una galaxia distante, se sabe también cuál es su espectro intrínseco, su espectro en el sistema de referencia en que se encuentra en reposo. Y conociendo la cantidad total de luz ultravioleta tal y como se mediría en ese sistema en reposo, se puede calcular la cantidad de estrellas de gran masa en aquella galaxia.



2. SE HAN DESCUBIERTO galaxias ultraluminosas en los primeros tiempos del universo temprano gracias al "bolómetro de uso común para el submilimétrico", o SCUBA, aparato instalado en el telescopio James Clerk Maxwell de Mauna Kea, en Hawai. Se sospecha que la mancha brillante de la izquierda es una galaxia primitiva cubierta de polvo, engendradora de estrellas a un ritmo trepidante, equivalente a más de mil soles por año.

Las estrellas de masa enorme viven apenas unas decenas de millones de años; un período muy corto según una vara de medir galáctica. Su número refleja, pues, las variaciones del ritmo global de formación estelar en la galaxia de que se trate. Cuando se reduce el ritmo a que se crean nuevas estrellas, el número de estrellas grandes disminuye enseguida porque su vida es corta. El número de estrellas de masa grande que se ha observado en la Vía Láctea —bastante parecida a las galaxias espirales de gran envergadura que tiene cerca— indica que en ella se están formando estrellas a un ritmo de unas pocas masas solares por año. En 1996 Piero Madau, ahora en la Universidad de California en Santa Cruz, aplicó idéntico método a los datos del Campo Profundo Norte del Hubble, ideales para este tipo de estudio porque incluyen mediciones precisas de intensidad en cuatro filtros de longitudes de onda. Madau combinó sus resultados con los disponibles a partir de observaciones ópticas de un corrimiento al rojo menor. Pretendía afinar la historia de la formación estelar en el universo. Concluyó que el ritmo de la generación de estrellas llegó a un máximo cuando el universo tenía entre cuatro mil y seis mil millones de años. Este resultado llevó a muchos a pensar que los mejores días del universo habían quedado atrás hacía ya mucho.

SCUBA y Chandra

El análisis de Madau de cómo ha ido evolucionando la formación de estrellas fue un hito importante, pero sólo abordó una pequeña parte del problema. Las búsquedas de galaxias con telescopios ópticos no detectan todas las fuentes del universo temprano. Cuanto más alejada esté una galaxia, mayor desplazamiento cosmológico al rojo sufrirá, y cuando el desplazamiento es muy elevado, la radiación óptica y ultravioleta en el sistema en reposo aparecerá en nuestros instrumentos corrida hacia la parte infrarroja del espectro. Es más, las estrellas suelen hallarse en entornos que las explosiones de supernovas y otros procesos vuelven muy polvorientos. La luz estelar calienta los granos de polvo, que radian después su energía en el infrarrojo lejano. En fuentes muy lejanas, la expansión del universo desplaza, hacia longitudes de onda submilimétricas (es decir, la convierte en ondas de radio cuya longitud no llega al milímetro), la luz absorbida por el polvo y reemitida en el infrarrojo lejano. Por tanto, una fuente que percibimos brillante en luz submilimétrica esconde con frecuencia una intensa formación estelar.

Hasta hace poco tiempo, no resultaba fácil tomar observaciones submilimétricas con los telescopios terrestres, en gran parte porque el vapor de agua de la atmósfera absorbe la señal en esas longitudes de onda. Pero las dificultades mermaron gracias al "bolómetro de uso común en el submilimétrico", SCUBA, una cámara instalada en 1997 en el telescopio James Clerk Maxwell de Mauna Kea. (Este observatorio, a una altura de cuatro kilómetros sobre el nivel del mar, se halla más arriba que el 97 % del vapor de agua de la atmósfera.) Varios grupos, uno de ellos dirigido por el autor, exploraron gracias a SCUBA diversas regiones del cielo con una sensibilidad y una profundidad que permitieron descubrir fuentes, aunque excepcionalmente luminosas, oscurecidas por polvo. Debido a la pobre resolución del instrumento, esas fuentes aparecen como manchas (*véase la figura 2*). Son bastante escasas: incluso tras muchas horas de exposición, apenas si se impresionan unas pocas en cada imagen de SCUBA; no obstante, se encuentran entre las galaxias más luminosas del universo. Que hasta la instalación de SCUBA no supiéramos siquiera que existían estos sistemas tan lejanos y vigorosos, nos recomienda humildad. Sus ritmos de formación de estrellas son cientos de veces mayores que los de las galaxias actuales, un indicio más de los mayores bríos del universo antiguo.

El descubrimiento de toda esta intensa formación de estrellas antes oculta fue revolucionario. Pero, ¿no podría estar el universo tapando otros procesos violentos? Por ejemplo, el gas y el polvo que rodean las galaxias podrían oscurecer la radiación procedente de los discos de material que circundan a los agujeros negros supermasivos (aquellos cuya masa es miles de millones de veces la solar). Se cree que estos discos constituyen las fuentes de energía no sólo de los cuásares, objetos de inmensa luminosidad con desplazamientos al rojo elevados, sino también de los núcleos activos en el centro de muchas galaxias próximas. Los estudios ópticos realizados en los años ochenta daban a entender que los cuásares abundaban más, varios miles de millones de años después de la gran explosión, que los núcleos activos de galaxias hoy en día. Los agujeros negros supermasivos que generaban la energía de los cuásares lejanos no se pueden haber destruido; por lo tanto, se presumía que muchas galaxias cercanas contenían cuásares extintos, agujeros negros que han agotado sus reservas.

Y, en efecto, se han descubierto estos agujeros negros supermasivos latentes gracias a su influencia gravitatoria. Las estrellas y el gas siguen orbitando a su alrededor aunque sólo un poco de materia caiga todavía en ellos. En el centro de la propia Vía Láctea reside un agujero negro apenas activo. La combinación de estos resultados llevó a suponer que la mayoría de los agujeros negros supermasivos formados durante la era de los cuásares agotaron, con su voraz crecimiento, el material que los rodeaba y desaparecieron de las

A. J. BARGER, L. L. COWIE, D. B. SANDERS, E. FULTON ET AL. *Telescopio James Clerk Maxwell*

ASI SE DESCUBREN GALAXIAS PRIMITIVAS

Para encontrar las galaxias más primitivas en una región del cielo, se utilizan filtros que seleccionan bandas espectrales en el ultravioleta, el verde y el rojo. Por la expansión del universo, la luz de las galaxias más lejanas está desplazada hacia el rojo; la gráfica (*arriba*) muestra que un corrimiento sustancial al rojo (alrededor de tres) mueve la radiación emitida por una galaxia lejana fuera de la banda ultravioleta. Como resultado, las galaxias primitivas aparecen en las imágenes tomadas con los filtros verde y rojo, pero no en las del filtro ultravioleta (*abajo*).

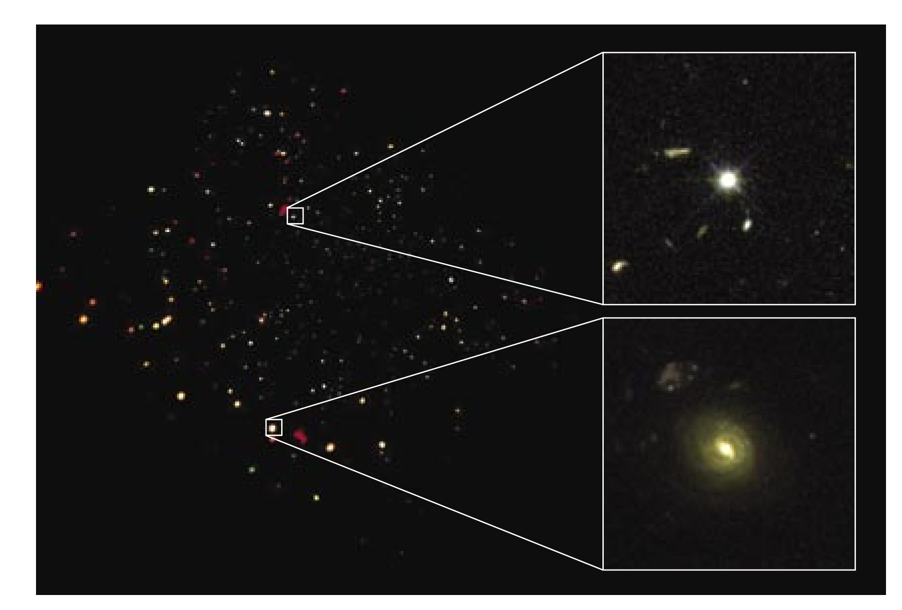
TOMMY MOORMAN (*gráfica*); CORTESIA DE CHARLES C. STEIDEL *Instituto Tecnológico de California* (*imágenes*)

observaciones ópticas una vez consumido el combustible. En pocas palabras: se creía que la actividad ligada a los cuásares fue, al igual que la formación estelar, bastante más vigorosa en un pasado lejano. Era la tercera señal de que vivíamos en tiempos más aburridos.

Pero el cuadro no estaba completo. A partir de las observaciones en rayos X y en luz visible, se está revisando ahora la conclusión a que se había llegado: que la gran mayoría de los cuásares murió hace mucho tiempo. La importancia de los rayos X estriba en que, al contrario que la luz visible, pueden atravesar el gas y el polvo que ocultan a los agujeros negros. Como la atmósfera terrestre bloquea los rayos X, se requieren telescopios espaciales —Chandra y el Observatorio de rayos X XMM/Newton— para detectar la actividad que un agujero negro genera a su alrededor [*véase* "Inventario cósmico", por Günther Hasinger y Roberto Gilli; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2002]. En el año 2000, Cowie, Richard F. Mushotzky, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA, Eric A. Richards, entonces en la Universidad estatal de Arizona, y yo nos valimos del telescopio Subaru de Mauna Kea para identificar los objetos visibles en las longitudes de onda ópticas correspondientes a las 20 fuentes de rayos X halladas por Chandra en un campo de observación determinado. Después, tomamos los espectros de esos objetos con el telescopio Keck de 10 metros.

Obtuvimos un resultado inesperado: muchos de los agujeros negros supermasivos activos detectados por Chandra residen en galaxias hasta cierto punto luminosas y cercanas. Los constructores de modelos del fondo cósmico de rayos X habían predicho la existencia de una numerosa población de agujeros negros supermasivos oscurecidos, pero nunca hubieran imaginado que estuvieran tan cerca. Es más, los espectros ópticos de muchas de estas galaxias no muestran ningún indicio de actividad ligada a los agujeros negros; sin las observaciones en rayos X, jamás se hubiera descubierto la presencia de tales agujeros negros supermasivos en el núcleo de las galaxias.

Este trabajo de investigación indica que no todos los agujeros negros supermasivos se formaron durante la era de los cuásares, sino que se han venido creando desde los tiempos más primitivos hasta el presente. No obstante, los que siguen activos no exhiben los mismos patrones de comportamiento que los antiguos cuásares. Los cuásares, voraces consumidores, engullen toda la materia que los rodea a ritmos altísimos. Por el contrario, la mayoría de las fuentes cercanas descubiertas por Chandra absorben materia con mayor moderación y, por lo tanto, brillan con menor intensidad. Se desconoce todavía el porqué de comportamientos tan diferentes. Una posibilidad es que los agujeros negros de hoy día cuenten con menos gas que puedan consumir. Las galaxias cercanas, más evolucionadas, padecen menos colisiones que las más primitivas y distantes, colisiones que conducirían el material hacia los agujeros negros supermasivos de los centros galácticos.



3. LAS OBSERVACIONES EN RAYOS X sirven para detectar agujeros negros ocultos. El observatorio de rayos X Chandra ha descubierto muchos en su exploración de la región Campo Norte Profundo (*izquierda*). Algunos son cuásares primitivos, muy brillantes, que florecieron unos pocos miles de millones de años después de la gran explosión (*arriba derecha*). Otros se hallan en el centro de galaxias no muy lejanas; están produciendo rayos X en la época actual (*abajo derecha*).

D.M. ALEXANDER, F.E. BAUER, W.N. BRANDT, G.P. GARMIRE ET AL. *NASA/Universidad estatal de Pennsylvania (imagen Chandra)*; A.J. BARGER Y M. GIAVALISCO *NASA/Great Observatories Origins Deep Survey (imágenes ópticas)*

Chandra reveló otro secreto: a pesar de que las fuentes moderadas de rayos X son mucho menos luminosas que los cuásares —generan apenas un uno por ciento de la radiación emitida por éstos—, al sumar la luz producida por todas las fuentes moderadas en los tiempos actuales se encuentra que es una décima parte de la originada por los cuásares en los tiempos remotos. La única forma de que este resultado tenga sentido es que existan hoy muchos más agujeros negros moderados y activos que cuásares activos en el pasado. En otras palabras, el contenido del universo ha evolucionado: de un número pequeño de objetos muy brillantes a un número grande de objetos débiles. Los agujeros negros supermasivos siguen formándose, pero son menores y consumen menos materia; a pesar de ello, su efecto combinado sigue siendo significativo.

Las galaxias donde se produce formación estelar también han experimentado una reducción cósmica. Cierto es que algunas galaxias cercanas generan estrellas con la profusión típica de las galaxias ultraluminosas, oscurecidas por el polvo, que descubrió SCUBA. Pero la densidad de galaxias muy luminosas en el universo presente es más de 400 veces menor que en el universo de antaño. De nuevo compensan las galaxias pequeñas esa diferencia. Un equipo integrado por Cowie, Gillian Wilson, ahora en el Centro de Análisis y Procesado de Datos Infrarrojos de la NASA, Doug J. Burke, hoy en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y el autor ha refinado las estimaciones de la densidad luminosa del universo. Estudiamos imágenes de muy buena calidad, tomadas con un amplio rango de filtros; realizamos a continuación su análisis espectroscópico. Encontramos que la densidad luminosa en luz óptica y ultravioleta no ha cambiado tanto con el paso cósmico del tiempo. A pesar de que el ritmo global de formación estelar ha caído en la segunda mitad de la vida del universo porque las galaxias gigantescas y polvorientas de antes ya no están creando estrellas, es tal la abundancia de galaxias pequeñas y cercanas con formación estelar, que la densidad de luz óptica y ultravioleta decae sólo poco a poco. Este resultado nos ofrece un pronóstico más optimista de la salud del universo.

Actividad madura

Esa persistencia de la vitalidad encaja bien con la teoría cosmológica. Según las recientes simulaciones por ordenador, el paso de la hegemonía de unas pocas galaxias vastas y vigorosas al imperio de muchas galaxias más pequeñas y mansas es una consecuencia directa de la expansión cósmica. A medida que el universo se expande, las galaxias se separan, las colisiones entre ellas escasean y el gas que las rodea, al enrarecerse, se calienta con mayor facilidad. Puesto que el gas caliente es más energético que el gas frío, no caerá tan fácilmente en el pozo de potencial gravitatorio de la galaxia. Fabrizio Nicastro, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y sus colaboradores han hallado hace poco una neblina intergaláctica caliente; la descubrieron porque absorbía la luz ultravioleta y los rayos X procedentes de cuásares y núcleos de galaxias activas más lejanos. Esa neblina caliente rodea a nuestra galaxia por todas partes; pertenece al Grupo Local galáctico, que incluye la Vía Láctea, Andrómeda y otras 30 galaxias de menor tamaño. Parece muy posible que este material gaseoso sea un residuo del proceso de creación de galaxias, pero ahora está ya demasiado caliente para engendrar nuevas generaciones galácticas.

Las galaxias pequeñas quizá residan en entornos más fríos: no habrán caldeado tanto el gas de sus alrededores, con la energía desprendida por supernovas y cuásares, como las grandes galaxias. Además, las galaxias pequeñas deben de haber consumido menos material, lo que les habría permitido continuar con su modesto estilo de vida hasta el presente. Por el contrario, las galaxias mayores, más dispendiosas, han secado sus fuentes, y ya no les es posible capturar nueva materia de sus alrededores. Los estudios en marcha sobre las propiedades gaseosas de las galaxias pequeñas y cercanas revelarán la interacción entre esos sistemas estelares y sus entornos; proporcionarán así claves para comprender la evolución galáctica.

No obstante, queda por resolver una parte crucial del problema: ¿cómo pudo el universo crear cuásares descomunales tan pronto? El Estudio Digital Sloan de los Cielos, gran proyecto astronómico que cartografía un cuarto del cielo y mide las distancias a más de un millón de objetos remotos, ha descubierto cuásares de cuando la edad del

universo era sólo un dieciseisavo de la actual; es decir, existían ya 800 millones de años después de la gran explosión. En el año 2003, Fabian Walter, entonces en el Observatorio Radioastronómico Nacional, y sus colaboradores observaron la señal del monóxido de carbono en la emisión de uno de estos cuásares. Puesto que el carbono y el oxígeno sólo se originan en las reacciones termonucleares de las estrellas, su presencia indica la importancia de la formación estelar ya durante los primeros cientos de millones de años del universo. Los últimos resultados de la Sonda Wilkinson para la Anisotropía en Microondas, un satélite que estudia la radiación del fondo cósmico, apuntan también a que empezó a haber estrellas 200 millones de años después de la gran explosión.

Las simulaciones por computadora muestran que las primeras estrellas fueron, con mucha probabilidad, cientos de veces más pesadas que el Sol. Esas estrellas brillaban tanto, que agotaban su combustible en apenas unas decenas de millones de años; se derrumbaban entonces sobre sí mismas, hasta crear unos agujeros negros que quizá fuesen las semillas de los agujeros negros supermasivos que encenderían los primeros cuásares. Puede que el estudio de las erupciones de rayos gamma, originadas seguramente durante la conversión de una estrella de masa muy grande en un agujero negro, respalde esa explicación de la precocidad de los primeros cuásares. Las erupciones de rayos gamma son las detonaciones más potentes que el universo ha conocido tras la gran explosión; se las detecta a distancias muy largas. En noviembre de 2004, la NASA lanzó la misión Swift. Este satélite, que ha costado 250 millones de dólares, lleva tres telescopios diseñados para observar estallidos en rayos gamma, rayos X, luz ultravioleta y luz visible. Las medidas que haga de los espectros de las erupciones y de su brillo remanente deberían mejorar nuestro conocimiento de los colapsos gravitatorios de las estrellas y del crecimiento de los agujeros negros supermasivos en el universo temprano.

La visión en rayos X que proporcionan los satélites Chandra y XMM/Newton nos ha abierto las regiones más polvorientas del universo. Las galaxias gigantes con intensa formación estelar y los agujeros negros más voraces del pasado del universo están ahora moribundos. En los próximos miles de millones de años, las galaxias pequeñas que hoy siguen activas habrán agotado la mayor parte de su combustible; la cantidad total de radiación cósmica menguará notablemente. Nuestra propia Vía Láctea sufrirá ese mismo destino. Mientras continúe la reducción de escala de la actividad cósmica, las galaxias enanas —que contienen apenas unos pocos millones de estrellas cada una, pero abundan más que los demás tipos de galaxias— se convertirán en las principales sedes de la formación de estrellas. Al final, sin embargo, el universo se oscurecerá. Sólo quedarán los fósiles de las galaxias de un glorioso pasado. Las viejas galaxias no mueren; sólo se apagan.

La autora

Amy J. Barger es profesora asociada de astronomía en la Universidad de Wisconsin-Madison. También enseña en la Universidad de Hawai en Manoa. Se doctoró en astronomía en 1997 en la Universidad de Cambridge y realizó investigaciones posdoctorales en el Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawai.

Bibliografía complementaria

STAR FORMATION HISTORY SINCE Z = 1 AS INFERRED FROM REST-FRAME ULTRAVIOLET LUMINOSITY DENSITY EVOLUTION. Gillian Wilson et al. en *Astronomical Journal*, vol. 124, págs. 1258-1265; septiembre 2002. Disponible en www.arxiv.org/abs/astro-ph/0203168.

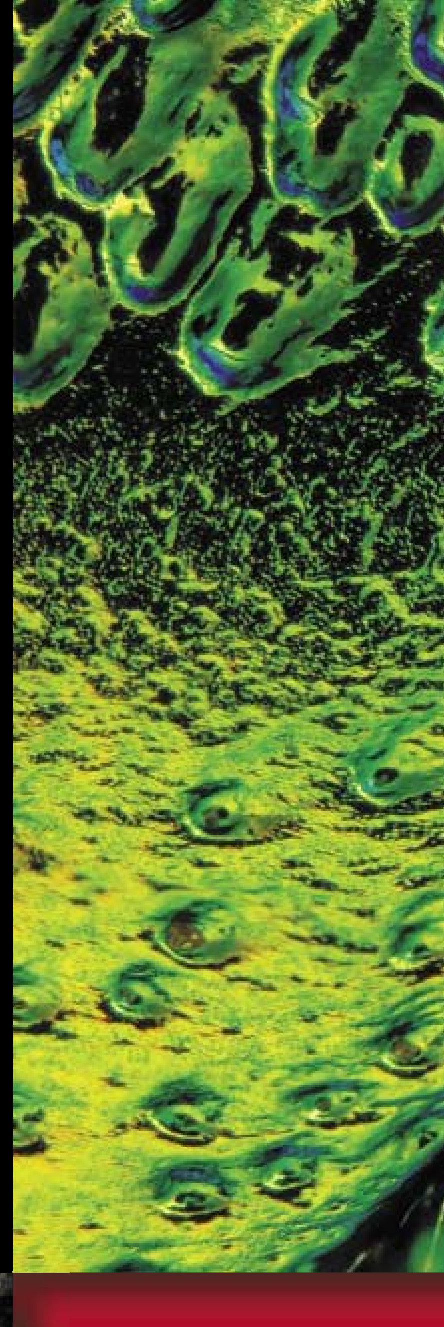
THE COSMIC EVOLUTION OF HARD X-RAY SELECTED ACTIVE GALACTIC NUCLEI. Amy J. Barger et al. *Astronomical Journal*, en prensa. Disponible en www.arxiv.org/abs/astro-ph/0410527.

SUPERMASSIVE BLACK HOLES IN THE DISTANT UNIVERSE. Dirigido por Amy J. Barger. Astrophysics and Space Science Library, vol. 308, Springer, 2004.

El ojo del observador

Las imágenes de un concurso de microfotografía exhiben bellezas que se escapan al ojo humano

Emily Harrison



1. UN MAR DE PECES DE COLORES y una mancha de petróleo en la carretera parecen estas fotografías de una mariposa nocturna de Madagascar y un escarabajo metálico. Kevin Mackenzie, de la Universidad escocesa de Aberdeen, ha utilizado luz natural e iluminación con fibra óptica para obtener este detalle del ala de *Argema mittrei* (100x). Charles B. Krebs, de la localidad estadounidense de Issaquah, ha captado esta imagen del ojo y el tórax del escarabajo *Chrysochroa fulminans* (45x) mediante luz natural reflejada.

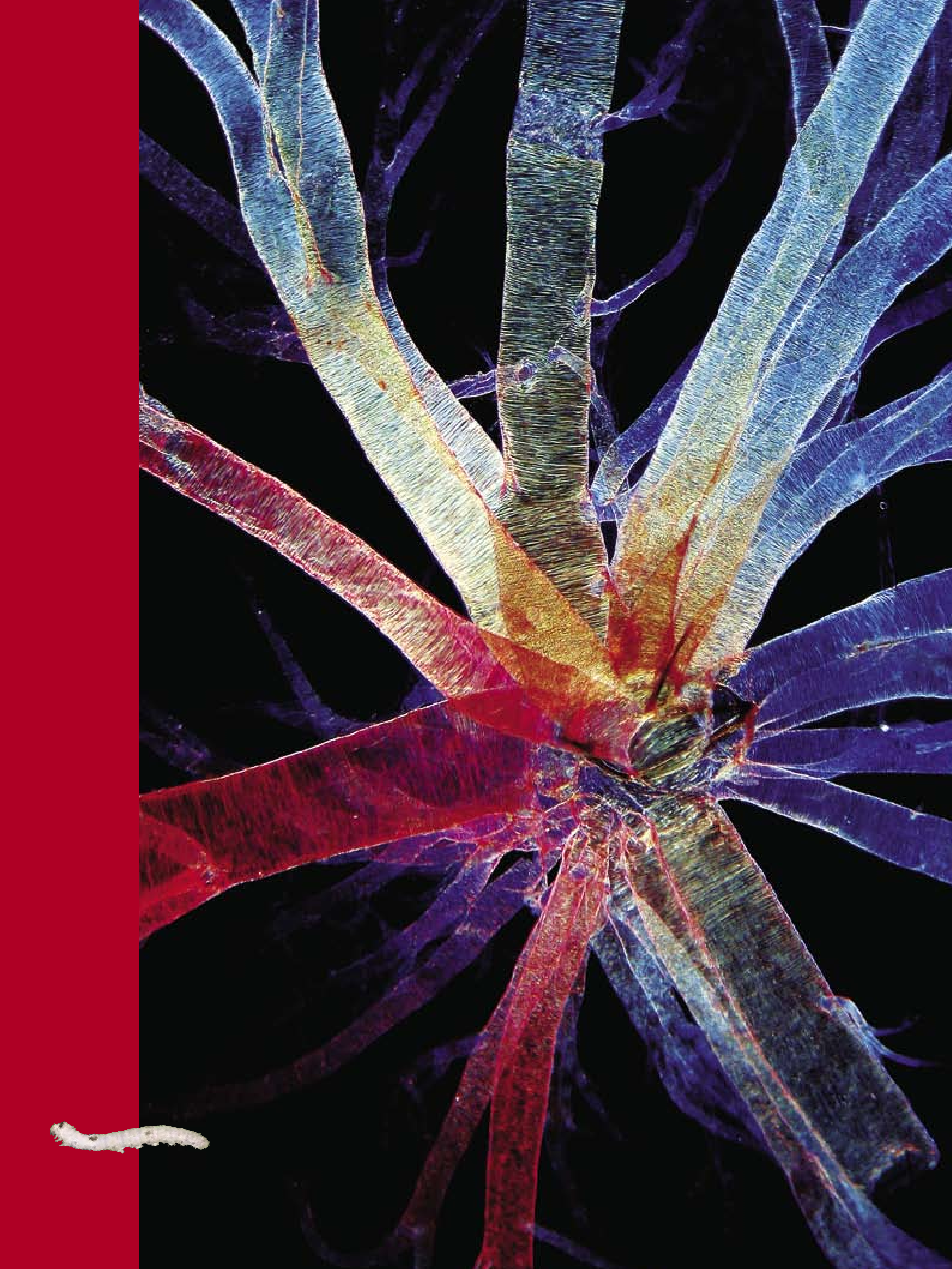


La belleza en el mundo es infinita, si poseemos los medios para contemplarla. Cuando deseamos ver más de lo que nuestros ojos alcanzan, la ciencia nos ofrece un repertorio maravilloso de técnicas. Con luz y lentes, el arte de la observación científica amplía el mundo visible más allá de las profundidades y las distancias que nuestros ojos pueden captar. Mientras los telescopios dilatan nuestra visión hacia el lejano espacio exterior, a miles de millones de años luz de distancia de cuanto percibimos en nuestro mundo cotidiano, los microscopios ópticos dirigen nuestra mirada hacia la profundidad de lo más íntimo. Alcanzan resoluciones finísimas, de una longitud de onda lumínica 1000 veces menor que cualquier cuerpo que observemos en el mundo macroscópico.

Estas imágenes muestran el arte de ver de cerca, según algunos de los maestros actuales de la fotomicroscopía. Cada una nos ofrece un retazo de vida que el ojo, sin ayuda exterior, se perdería.

Continúa en la página 29







PAOLO MAZZEI (*gusano de seda*)

2. LA GEOMETRIA EXTRAVAGANTE abunda incluso entre los gusanos. Mediante iluminación en cámara oscura, Greg W. Rouse, del Museo de Australia Meridional en Adelaida, tomó esta imagen (*arriba*) del poliqueto poligonal *Myrianida pachycera* (45X). Ian C. Walker, de la localidad inglesa de Huddersfield, ha fotografiado la tráquea de un gusano de seda (70X).





3. SALPICADAS DE POLEN, estas estampas íntimas muestran los estadios iniciales del ciclo biológico. Shirley A. Owens, de la Universidad estatal de Míchigan, captó estos granos de polen en forma de vaina en la antera de la flor *Trandescantia virginiana* (1450x), fotografiada mediante microscopía láser confocal. El delgado tronco de árbol decorado con luces (*derecha*) corresponde en realidad al estigma del diente de león *Taraxacum* (160x), fotografiado mediante fluorescencia por Róbert Márkus, de la Academia húngara de Ciencias en Szeged.

Viene de la página 25

Aumento, resolución y contraste —las mismas propiedades que un compositor articula en la audición para crear piezas musicales de gran dinamismo— traen a la vista del ocular del microscopio lo muy pequeño y, a menudo, muy transparente. Para percibir los rasgos característicos de la muestra en estudio, el experto en microscopía puede teñir los azúcares, etiquetar sus proteínas con marcadores fluorescentes, dotarla de los colores del arco iris o ensombrecerla desde múltiples ángulos para resaltar sus contornos. Así se obtienen imágenes como éstas, que ofrecen una sinfonía de luz y revelación.

Emily Harrison es editor de fotografía de Scientific American-Investigación y Ciencia.

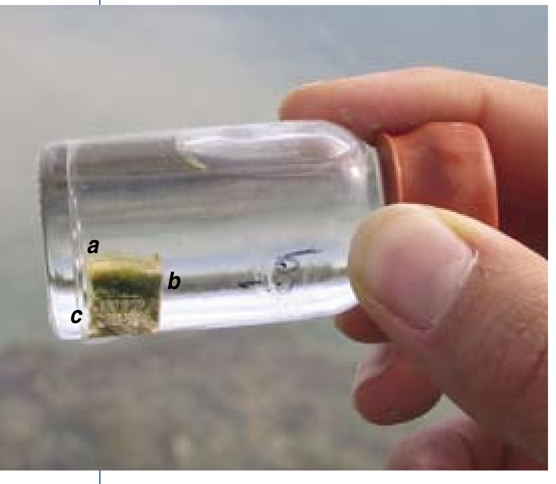


Microbiología evolutiva

Los estromatolitos de Cuatro Ciénegas

Cuatro Ciénegas constituye un sistema complejo de manantiales fríos y calientes, marismas, ríos y lagunas de desecación con agua muy pobre en fósforo y rica en sales. Presenta una diversidad de microorganismos espectacular. Medran en sus múltiples pozas y forman consorcios microbianos. Este "acuario en el desierto", así se le ha denominado al ecosistema, se halla en peligro de extinción por el desvío incesante de recursos hídricos a los cultivos de alfalfa.

Situado en el estado de Coahuila, en México septentrional, Cuatro Ciénegas ocupa una extensión de 150.000 km^2. Se encuentra a 735 metros sobre el nivel del mar. Tiene forma de mariposa, rodeada por tres serranías: la Purísima, la Fragua y la Madera. Con un suelo de roca caliza, que emergió, por acción tectónica, de los fondos marinos, hay en las serranías picos de hasta 3000 metros de altura.



1. Estromatolitos de Cuatro Ciénegas. Se observan las diversas capas del tapiz microbiano: en la superficie, gran diversidad de diatomeas y filamentos de la cianobacteria *Calothrix* sp. entre otras (*a*); la segunda capa presenta una mayor abundancia de filamentos de otras cianobacterias, además de *Calothrix* sp., como *Halomicronema excentricum*, *Plectonema* cf. *battersii*, *Oscillatoria neglecta* y *Leptolyngbya* sp. (*b*); en la tercera predominan las bacterias heterótrofas (*c*).

Las "alas de la mariposa" se parten por la sierra de San Marcos y la falla inversa de San Marcos, quebrada que presenta surgencias de basalto. Algunos de los manantiales son termales (30-35 ºC), lo que nos habla de un magma profundo en la falla. En el camino superficial del agua de esos manantiales, su temperatura disminuye corriente abajo, por disipación, o por mezcla con la procedente de otras fuentes que tejen el sistema hidrológico.

La falta de fósforo en el agua convierte a Cuatro Ciénegas en un sistema oligotrófico; las algas alcanzan un crecimiento limitado. La cadena trófica recuerda allí la que se supone característica del Cámbrico temprano, hace unos 540 millones de años. En esa época, las bacterias fotótrofas, quimioautótrofas y heterótrofas de los consorcios microbianos constituían la fuente de alimento de los metazoos: camarones, caracoles y peces.

Suele tratarse de aguas duras. Contienen gran cantidad de sales de calcio, magnesio, sodio, potasio, sulfatos, carbonatos y cloruros. La dureza aumenta con su curso desde los manantiales hasta los ríos y las lagunas de desecación; en éstas la salinidad alcanza el nivel de saturación. El *p*H cambia de forma paralela y varía de neutro (7,0-7,2) en los manantiales a básico (8,0-9,7) en los lagos terminales en fase de desecación.

En razón de su extraordinaria riqueza de especies, muchas de ellas endémicas, Cuatro Ciénegas fue declarada Reserva de la Biosfera en 1994. Apenas si se ha explorado la razón de tamaña biodiversidad, aunque se ha sugerido que el valle sirvió de refugio a los peces y la fauna terrestre del Pleistoceno. La historia geológica del valle podría dar cuenta también de esa variedad de especies; formó parte de la región costera del proto-Golfo de México, hace al menos 206 millones de años, en cuyo momento se desarrollaron las comunidades de tapices microbianos y estromatolitos con sus invertebrados asociados (caracoles y crustáceos). Este relicto del mar del Jurásico quedó aislado de la costa hace unos 150 millones de años, cuando se produjo la elevación de la región oriental del continente norteamericano.

Los tapices microbianos y los estromatolitos son estructuras formadas por consorcios de procariotas, que se distinguen por una notable complejidad taxonómica y un destacado dinamismo metabólico. Estos consorcios revisten suma importancia evolutiva. Sabido es que los estromatolitos constituyen los fósiles conocidos más antiguos de nuestro planeta; dominan el registro fósil durante los miles de millones de años de vida que precedieron al Cámbrico. Merced a su elevado componente mineral, los estromatolitos oponen resistencia a los procesos de transformación geológica, por cuya razón han persistido fósiles. En la actualidad crecen adosados a taludes o en el fondo de aguas someras, formando arrecifes en miniatura, o sueltos a la manera de esférulas deformadas sobre los sedimentos (oncolitos).

En general, los estromatolitos medran sólo en ambientes muy particulares: zonas de intermareas marinas, de elevada salinidad, y enclaves de agua dulce, rica en calcio; estos hábitats suelen ser pobres en especies ajenas a los estromatolitos. Cuatro Ciénegas constituye el lugar del planeta que alberga mayor diversidad de estromatolitos y tapices microbianos vivos. Nuestros estudios indican que dichos consorcios microbianos podrían encontrarse en la base de la cadena trófica de este sistema.

Desde otro punto de vista, los tapices microbianos y estromatolitos representan un modelo excelente para el estudio de la ecología microbiana y la biogeoquímica. Observamos allí



2. Poza Azul. Cuatro Ciénegas, Coahuila. Bajo el agua se observan arrecifes de estromatolitos.

gradientes fisicoquímicos del medio a los que se han adaptado los diferentes componentes del consorcio. Destacan los consorcios por su eficaz fijación de carbono, nitrógeno y azufre, con su consiguiente repercusión en los ciclos biogeoquímicos.

Ahora bien, si estas maravillas microbianas resultan tan eficaces, ¿por qué no las vemos repartidas por todo tipo de ambientes? Demuestra el registro fósil que se produjo una caída de la abundancia de estromatolitos hacia el Cámbrico temprano; merma que se atribuye a su tasa de crecimiento, muy lenta, y a la acción directa de los herbívoros primitivos. Tales consorcios quedaron confinados a ambientes extremos de escasez nutrientes y alta salinidad, que impedían el desarrollo de muchos metazoos diversos. Este es el ambiente que encuentran hoy en Cuatro Ciénegas.

Los diferentes grupos bacterianos que integran estos consorcios se organizan en láminas horizontales, en una disposición que depende de las características biogeoquímicas requeridas por cada grupo metabólico. En los estromatolitos de Cuatro Ciénegas se observa una capa superficial de color verde claro, que alberga una gran diversidad de diatomeas y filamentos de *Calothrix* sp., cianobacteria portadora de scitonemina, un pigmento que, al proteger de la radiación ultravioleta, facilita el crecimiento celular. En la segunda capa, de color verde oscuro, se aprecia una mayor abundancia de filamentos de *Calothrix* sp. y de otras cianobacterias como *Halomicronema excentricum*, *Plectonema* cf. *battersii*, *Oscillatoria neglecta* y *Leptolyngbya* sp.; se estima que la actividad de fijación de C y de N_2 es máxima en esta capa. En la tercera, de color café, se reduce la presencia de filamentos de cianobacterias y abundan las bacterias heterótrofas, ya que ahí es donde se acumula mayor cantidad de materia orgánica.

Si por sí solos los microorganismos hacen ya de Cuatro Ciénegas un atractivo laboratorio vivo, la coexistencia de las comunidades estromatolíticas con peces, caracoles, crustáceos y otros animales complejos, convierten a estos manantiales y pozas en un ecosistema único en el mundo moderno. Además, este valle permite estudiar la evolución temprana de la vida en nuestro planeta. La variedad de ambientes particulares, la abundancia de especies endémicas y la elevada biodiversidad configuran un tesoro que debe conservarse para las generaciones futuras.

Sin embargo, la labor de conservación debe afrontar varios obstáculos. Por una parte, debido a las condiciones ambientales extremas, se trata de un ecosistema extraordinariamente frágil. Por otra, la actividad agrícola provoca alteraciones del entorno con efectos dramáticos para la diversidad: fertilizantes y pesticidas que contaminan los acuíferos y desvíos del agua para el riego que termina por agotar cauces y pozas naturales.

LUISA I. FALCÓN, LUIS E. EGUIARTE
y VALERIA SOUZA
Depto. de Ecología Evolutiva,
Instituto de Ecología UNAM,
Coyoacán (México)

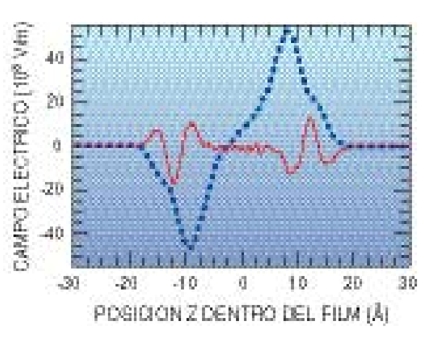
Comportamiento eléctrico anómalo del agua

Películas negras de Newton

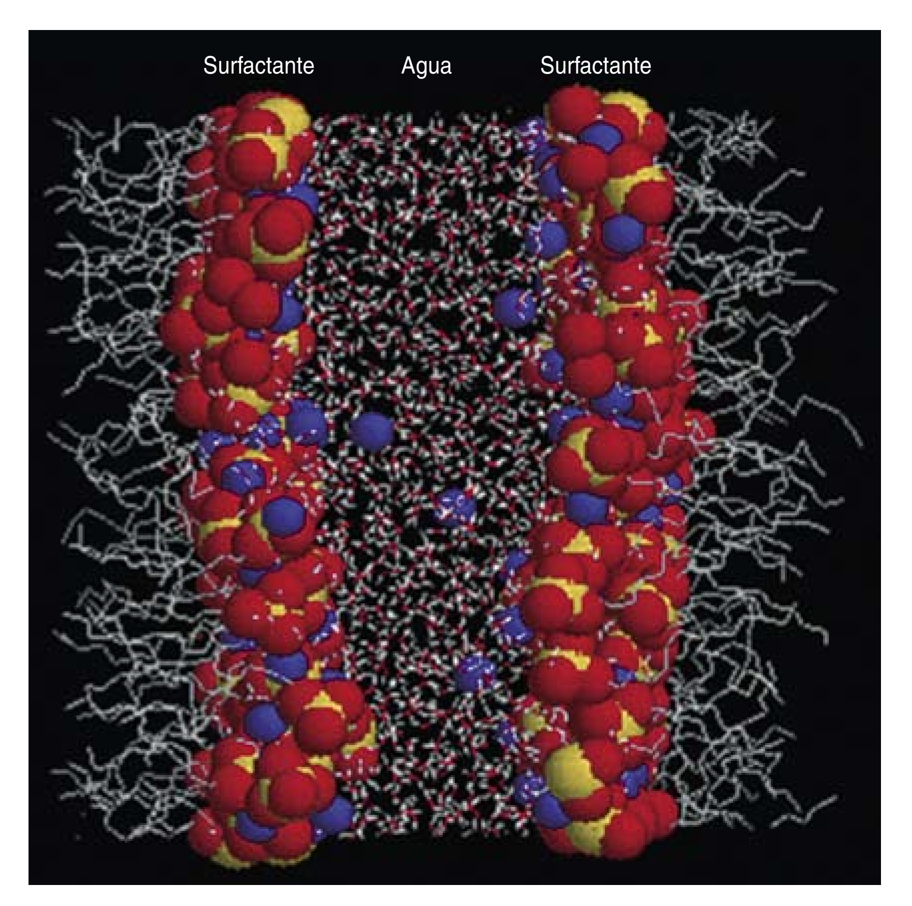
El agua no deja de sorprendernos. Sus propiedades han desafiado, una vez más, nuestro conocimiento científico. En fecha reciente, hemos mostrado que el agua atrapada entre películas de detergente común (el surfactante Dodecil sulfato sódico, o SDS) presenta un comportamiento eléctrico anómalo. Estos resultados podrían arrojar luz sobre campos tan diversos como la fisicoquímica de los detergentes, la física de los líquidos y la biofísica de las membranas celulares.

En circunstancias ordinarias, el agua se comporta como un medio dieléctrico con una permisividad relativa de 80; significa esto que atenúa los campos eléctricos que se le aplican hasta hacer su intensidad 80 veces más pequeña. Las consecuencias químicas de este fenómeno revisten suma importancia. Afecta, por ejemplo, a los campos y fuerzas eléctricos que crea el SDS y otros surfactantes iónicos, que intervienen en la formación de burbujas y espuma. Las teorías físicoquímicas actuales permiten predecir estos campos en determinadas experimentos, pero fracasan en otros. Todavía no sabemos qué es lo que falla.

Para resolver ese enigma, hemos estudiado capas de agua de entre 0,75 y 5 nanómetros de ancho, recubiertas de SDS, como las que forman las paredes de las burbujas de jabón. Reciben el nombre de películas negras de Newton, en honor a Isaac Newton, el primero en estudiarlas. (Bajo una luminosidad normal muestran una coloración negra, a diferencia de las burbujas o pelícu-



1. Campo eléctrico debido sólo a la respuesta dieléctrica del agua (*línea de puntos*). Campo eléctrico total creado por los iones del surfactante (SD^- y Na^+) y las moléculas de agua (*línea continua*); en virtud del comportamiento eléctrico anómalo del agua, aparece confinado en una estrecha región de contacto entre las dos sustancias.



2. Película negra de Newton: capa acuosa de un grosor —en general— entre 0,75 y 5 nanómetros de ancho recubierta de detergente. En la imagen se distinguen los átomos de sodio (*azul*) y las cabezas de surfactante (*rojo y amarillo*) del SDS. Estructuras como ésta se encuentran en las paredes de las burbujas de jabón.

las más gruesas, que se presentan en colores.) En razón de su semejanza con las membranas celulares, resultan útiles para crear modelos sobre las fuerzas que actúan durante la fusión de dos membranas biológicas y otros procesos de parejo interés.

Hemos realizado simulaciones por ordenador de sistemas en equilibrio termodinámico formados por capas delgadas de agua recubiertas de moléculas de SDS. Los cálculos se realizaron en uno de los supercomputadores más potentes del mundo: el HPCx del Centro de Supercomputación de Edimburgo.

El campo eléctrico generado por el surfactante ionizado debería reducirse en un factor de 80 debido al comportamiento dieléctrico del agua. Eso afirma la teoría vigente. Sin embargo, la realidad observada revela otra cosa. El agua se comporta de una forma atípica: se organiza en su conjunto para formar estructuras complejas. Crea así capas de unas tres moléculas de grosor, ligadas a las moléculas de SDS. Ello le permite contrarrestar el campo eléctrico que crea el surfactante ionizado. A medida que nos alejamos del surfactante, la organización del agua decrece. Se observa, pues, un campo eléctrico enteramente confinado en una estrecha región de contacto entre el surfactante y el agua, campo que se anula en el resto de la película acuosa.

Resulta sorprendente que el agua no responda de forma local a las variaciones del campo creado por el surfactante, como se esperaría en un medio dieléctrico ordinario. Se comporta, en cambio, de forma global. Si se trata de película fina de agua, el comportamiento global ofrece mayor estabilidad termodinámica que el local. Cabe pensar que esta respuesta anómala se manifieste en numerosos sistemas de interés biológico donde el agua está en contacto con especies dotadas de carga eléctrica; por ejemplo, en el caso de las interacciones entre membranas celulares o entre cadenas de ADN.

JORDI FARAUDO
Depto. de Física, Universidad Autónoma de Barcelona
FERNANDO BRESME
Depto. de Química, Imperial College, Londres

El bacalao salado

Su origen y preparación

Desde muy antiguo, se ha consumido bacalao en los países nórdicos. Se empleaba el secado al sol como medio de conservarlo. Al que para su secado se exponía en pértigas, de las que colgaban pares de ejemplares atados entre sí por la cola, se le llamaba “stockfish”. Se le distinguía del “rockfish”, bacalao seco también, que había sufrido previamente un ligero salado. Se atribuye a los balleneros vascos la aplicación del salado como método de conservación del bacalao. En comparación con los países del norte de Europa, la sal abundaba en los países mediterráneos.

El bacalao salado se convirtió pronto en el rey de las salazones. En esa situación de privilegio ha permanecido durante siglos, aportando proteínas de elevado valor biológico a la dieta de numerosas regiones del mundo. Una afortunada conjunción de factores, algunos concatenados, lo posibilitó: abundancia, fácil captura, precio asequible, su naturaleza de pescado blanco (con muy bajo contenido en grasa) que permitía una prolongada conservación, menor proclividad al enranciamiento y desarrollo de una serie de aromas y sabores muy apreciados por los consumidores. Añádase a ello, en los países católicos, la abstinencia de carne en cuaresma, los viernes de todo el año y determinadas vigilias religiosas, que venían a suponer unos 120 días al año, que potenció su consumo como fuente de proteínas.

El bacalao salado empezó a tener gran importancia comercial en España en el siglo XVI.



Existe constancia de que el bacalao salado comenzó adquirir importancia comercial en España a partir del siglo XVI. Se introdujo en el mercado ante la escasez de merluza secada al aire, que era el pescado cecial que ocupaba antes su lugar en los hábitos de consumo de los españoles. Arraigó tanto que, cuando se emplea todavía hoy la palabra bacalao evocamos a su forma salada.

Un producto hoy harto común en las mesas de España entera, aunque con particular incidencia en el País Vasco y Cataluña, distinguíanse antaño dos ámbitos de consumo. De bacalao seco se alimentaban los esclavos de las plantaciones de caña de azúcar del Caribe, práctica que sigue siendo hoy habitual en ambas zonas. La expresión castellana "el que corta el bacalao", para referirse a la persona que manda, parece derivar de ese contexto: en los ingenios azucareros el que "cortaba el bacalao" era el capataz. El otro ámbito de consumo corresponde a Europa, cuyos consumidores eran mucho más exigentes en cuanto a la calidad del producto salazonado.

El mercado caribeño se aprovisionaba del bacalao procedente de los bancos de Terranova y El Labrador. Europa terminó abasteciéndose con las capturas en sus propias aguas septentrionales; su mayor calidad respondía a un proceso más refinado de elaboración.

La forma tradicional de obtención del bacalao salado ha sido el apilado de capas sucesivas de sal y pescado eviscerado y limpio. Los montones suelen alcanzar en torno a un metro. El tiempo mínimo del proceso de salado o curado dura un par de semanas, en el transcurso de las cuales penetra cantidad suficiente de sal en el interior del bacalao para hacerlo estable y se desarrollan el sabor y aroma característicos. Al final del período de permanencia en pila de sal, se separan las piezas y se eliminan los cristales de sal de la superficie. El bacalao así obtenido se conoce como "bacalao verde". Pasa éste a la operación de secado, que rinde el bacalao seco-salado; suele clasificársele en función de la humedad absorbida.

Además de apilarlo en sal sólida, se puede salar sumergiéndolo en salmuera o a través de llamado salado mixto; en este tercer procedimiento, el bacalao empieza rodeado de sal sólida y acaba rodeado de una salmuera debido a la disolución de la sal en el agua que sale del interior del bacalao durante el salado. Algunas empresas al salado con sal sólida le anteponen un salado con salmuera durante varias horas.

En otro orden, conviene distinguir entre "bacalao nacional" y de "importación". El primero se elabora en bacaladeros españoles que faenan en mares del norte. Salan apiladas las piezas en alta mar. El bacalao de importación suele proceder de Noruega, Islandia y Dinamarca, con bancos en sus propias aguas. Sus barcos salan las piezas de bacalao, frescas, refrigeradas o congeladas, en factorías ubicadas cerca de las áreas de pesca. La investigación ha demostrado que el rendimiento del salado del bacalao antes de que entre en *rigor mortis* es mucho menor que cuando se le sala tras varios días de almacenamiento.

El bacalao salado pasa actualmente por una situación contradictoria. Por un lado se ha convertido en un producto muy apreciado como ingrediente de platos típicos, pero por otro lado sufre una serie de factores adversos. Nos encontramos, además, con unos bancos esquilmados. De hecho, atravesamos un período de moratoria, que prohíbe pescar bacalao en Terranova y zonas cercanas. Aunque no de una forma tan drástica, también se aprecia una disminución de los bancos de bacalao del norte de Europa.

Por otro lado, asistimos a una tendencia hacia el consumo de productos con bajo contenido en sodio para reducir riesgos cardiovasculares conduce a la exclusión del bacalao de muchos regímenes alimenticios.

El bacalao salado, por último, ha de hacer frente a los cambios en los hábitos de vida. Las empresas comercializadoras han introducido en el mercado bacalao desalado congelado, que una vez descongelado se encuentra listo para ser cocinado.

JOSÉ MANUEL BARAT
Depto. Tecnología de Alimentos,
Universidad Politécnica
Valencia

Texto y fotografías: Ricardo Anadón

Una bomba biológica en la Antártida

1. Durante el deshielo, en el transcurso del breve verano austral, se producen intensas floraciones de microalgas. Estas constituyen la base del transporte acelerado de materiales carbonatados hasta el sedimento. Durante las campañas oceanográficas FRUELA se utilizaron trampas de sedimentación (*abajo*) para medir el efecto de la "bomba biológica" de carbono en las aguas antárticas.



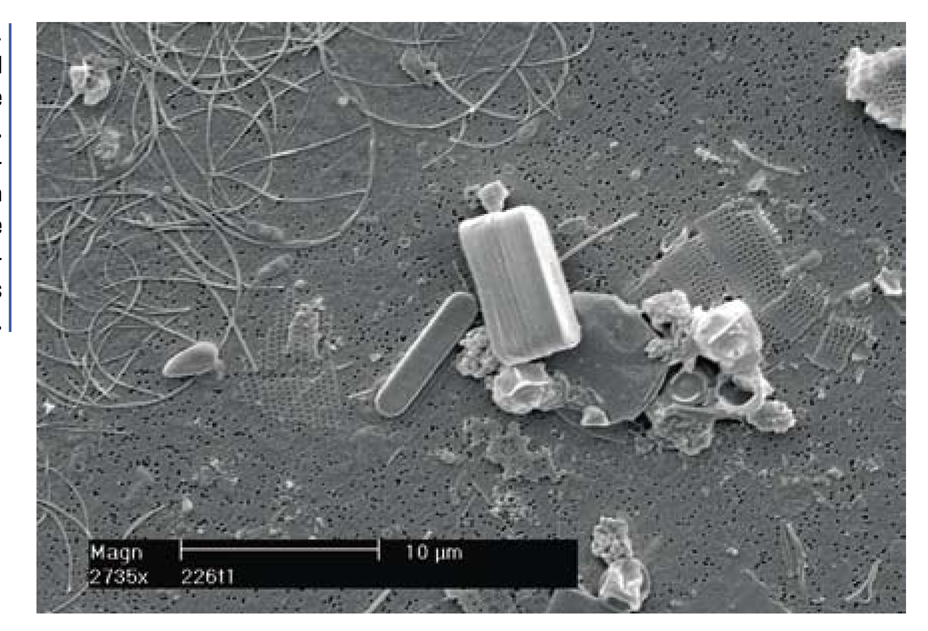
Los océanos inciden en el clima a través del intercambio de dióxido de carbono con la atmósfera. Mediante la asimilación del carbono disuelto, las microalgas y todos los organismos que medran en las aguas superficiales facilitan el transporte de partículas orgánicas hacia el sedimento y las capas profundas. El material carbonatado depositado se entierra bajo nuevas capas de sedimento y permanece almacenado durante millones de años hasta transformarse en nueva roca sedimentaria. A este mecanismo de transporte acelerado de carbono se le denomina "bomba biológica" de carbono.

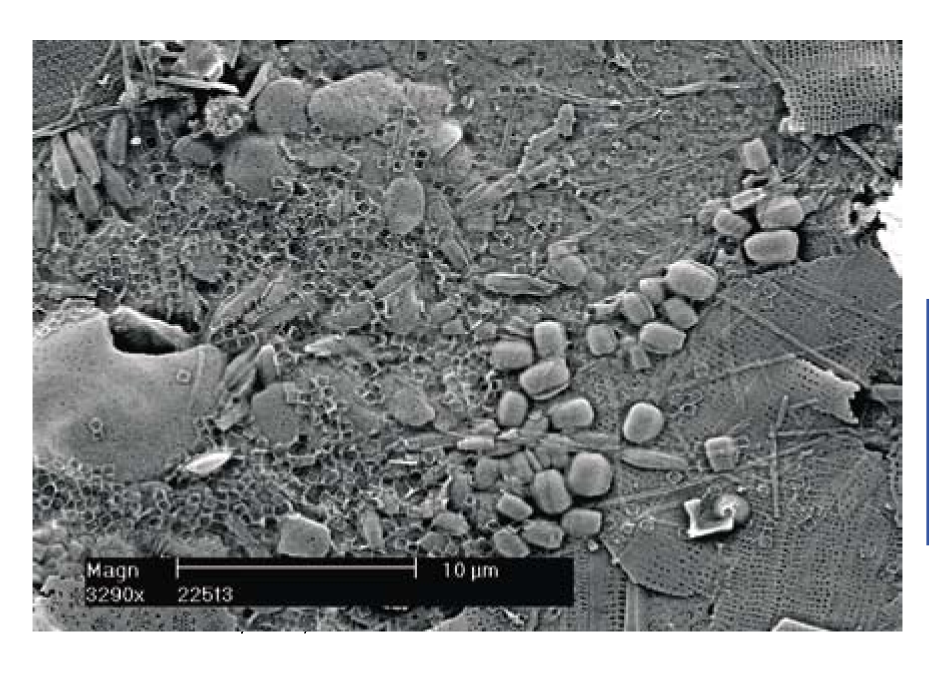
En el transcurso del verano austral, en las aguas antárticas se producen intensas floraciones de microalgas, que aprovechan la elevada disponibilidad de nutrientes y el comienzo de la estratificación estival. De ellas se alimentan el krill y las salpas, entre otros organismos del zooplancton. Ambos producen paquetes fecales de gran tamaño, que se hunden a velocidades de hasta un kilómetro diario. En estas áreas oceánicas, la "bomba biológica" desempeña una importante función en el transporte vertical de carbono; el sedimento se convierte así en un sumidero de carbono atmosférico. Las campañas oceanográficas del proyecto FRUELA analizaron el funcionamiento de la bomba biológica en estas áreas productivas. Se recogieron los materiales que sedimentaban con trampas; después de filtrarlos (a través de un filtro de 0,2 micras) se observaron mediante microscopía electrónica de barrido. Entre los sedimentos antárticos destacan las células de fitoplancton, fracciones de las mismas, agregados de diversos materiales y paquetes fecales de gran tamaño.



2. En las zonas de mayor productividad, con elevada concentración de fitoplancton, el filtro de sedimentos aparece recubierto por un material orgánico amorfo. Sobre éste se observan valvas de diatomeas aisladas o en cadena (*Eucampia antarctica*, *Coccinodiscus* sp, *Rhizosolenia* sp y *Corethron antarctica*) y un paquete fecal de eufausiáceo.

3. En áreas poco productivas, con escasa sedimentación, el filtro de sedimentos aparece limpio de materiales orgánicos. En su lugar se observan diatomeas aisladas o en cadena (*Fragilariopsis* sp), restos de valvas, espinas de otra diatomea (*Chaetoceros*) y pequeños dinoflagelados.





4. Esta imagen aumentada muestra la complejidad de los agregados recogidos en el filtro de sedimentos. Se observan restos de diatomeas, escamas de *Pyramimonas* y material no identificable, posiblemente orgánico.

Gases de Fermi atrapados ópticamente

Unos pocos cientos de miles de átomos, enfriados casi al cero absoluto, simulan la física de otros sistemas singulares, como las estrellas de neutrones y los superconductores

John E. Thomas y Michael E. Gehm

El cuenco, que apenas mide un milímetro de largo por una décima de milímetro de ancho, tiene paredes de pura luz. Un recipiente etéreo, como exige su contenido, un conjunto de átomos de litio enfriados a menos de una millonésima de grado por encima del cero absoluto. Pero no debemos pensar que esa muestra atrapada en la vasija de luz es una mera nube de litio (al igual que no pensamos que un diamante sea un cúmulo de carbonos). Su verdadero valor se encuentra, no en los átomos que la componen, sino en su singular configuración: la de un gas de Fermi degenerado. Se trata de un nuevo estado de la materia; quizá, de cuantos pueda haber en una mesa de laboratorio, el estado más próximo a una estrella de neutrones y a la materia quark del universo primigenio.

Aunque predicha la existencia de los gases de Fermi degenerados hacia los años treinta del siglo pasado, no se creó uno realmente independiente, en el laboratorio, hasta hace algo más de un lustro. Lo más parecido que conocíamos era la nube de electrones del interior del cobre o de cualquier metal común. A pesar de la solidez del metal, los electrones se comportan como un gas: cuentan con libertad para moverse (por eso conducen electricidad los metales), pero sus energías han de seguir un estricto orden jerárquico, el mismo hallado en los gases de Fermi degenerados que hemos producido.

Estos gases están relacionados con otro curioso ente cuántico que aparece a temperaturas muy bajas: el condensado de Bose-Einstein. El equipo de Eric Cornell y de Carl Wieman, de la Universidad de Colorado, creó el primero de esos condensados en 1995. (En el año 2001, Cornell y Wieman fueron galardonados por su trabajo con el Premio Nobel junto con Wolfgang Ketterle, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, MIT).

El gas atómico degenerado de Fermi resulta más difícil de crear porque enfrenta entre sí dos preceptos de la mecánica cuántica: el principio de indeterminación de Heisenberg y el principio de exclusión de Pauli. El primero establece que la posición de una partícula se hace más ambigua cuanto mejor se conoce su velocidad. En un gas ultrafrío, la velocidad de los átomos se conoce con una gran precisión: casi cero. Por lo tanto, los átomos se expanden en manchas de diez a mil veces mayores que los átomos a temperatura ambiente. Estos borrones no representan un problema para el condensado de Bose-Einstein, porque lo componen átomos "sociables", de la familia de los bosones, que gustan de solaparse. Pero el gas de Fermi degenerado está formado por átomos aislados, del tipo de los fermiones (como el litio de nuestra trampa), los cuales, de acuerdo con el principio de exclusión de Pauli, no pueden compartir el espacio con sus vecinos. Fabricar uno de estos gases viene a ser como querer guardar globos en un armario.

Recientemente, nuestro grupo ha podido examinar la naturaleza cuántica de los globos expandiendo su tamaño por medio de una estratagema cuántica: recurrir a las interacciones fuertes, que ligan átomos entre sí a distancias mucho mayores que las ordinarias. Existen algunos indicios interesantes, todavía no probados, de que las interacciones fuertes hacen que los átomos se agrupen en "pares de Cooper". La presencia de pares de Cooper explica la superconductividad y algunos tipos de la superfluidez. Pero antes de que describamos las propiedades más notables del gas, tomémonos unos momentos para detallar los grandes obstáculos técnicos que hubo que superar.

Enfriamiento por láser

La creación de sistemas cuánticos macroscópicos, como los gases de Fermi degenerados y los condensados de Bose-Einstein, ha sido posible gracias a los avances técnicos del enfriamiento óptico. En la mayoría de los experimentos con gases ultrafríos, los campos magnéticos atrapan a los átomos. Los cuencos ópticos utilizan, en cambio, campos eléctricos, que tienen la particularidad de acorralar cualquier clase de átomo, mientras que las trampas magnéticas actúan sólo sobre ciertos tipos.

En el caso más simple, un cuenco óptico consiste en un intenso rayo láser muy enfocado hacia una determinada región donde se ha hecho un vacío casi perfecto. La luz dirige los átomos o moléculas fríos hacia el punto focal, donde los confina en un entorno sin calor y sin fricciones, ideal para el estudio de los fenómenos fundamentales.

¿Por qué un haz de luz enfocado atrae a los átomos? La luz es una onda electromagnética, formada por campos magnéticos y eléctricos oscilantes. El campo eléctrico de un rayo de luz ejerce una fuerza sobre las partículas con carga, y los electrones y los protones del átomo están cargadas. Un átomo, no obstante, tiene el mismo número de electrones y protones y, por lo tanto, es eléctricamente neutro. Aun así, aparece una fuerza, por una razón un tanto sutil: el gradiente del campo.

Si, por ejemplo, el campo eléctrico apunta hacia arriba y hacia el foco, el núcleo de un átomo, cargado positivamente, que se encuentre debajo del haz de luz será atraído hacia arriba, mientras que su nube electrónica, de carga negativa, sufrirá una atracción hacia abajo. El núcleo, al estar más cerca del foco del haz, donde el campo eléctrico es mayor, experimentará una atracción un poco superior a la repulsión de la nube de electrones. Habrá, pues, una fuerza neta hacia arriba que actuará sobre los átomos. Si la situación fuera a la inversa, con el campo eléctrico apuntando al revés que el haz de luz, los núcleos se alejarían y la nube de electrones se acercaría. La fuerza neta seguiría estando dirigida hacia el foco. Por razones demasiado complejas para explicarlas aquí, sucede lo mismo con los átomos situados a lo largo del eje del haz de luz, aunque por delante y por detrás del foco. Por lo tanto, sin importar en qué dirección apunta el campo eléctrico, el átomo será siempre atraído suavemente hacia el interior.

La palabra clave es “suavemente”. A temperatura ambiente, o incluso muy por debajo de ella, los movimientos térmicos aleatorios de un átomo superan con creces el débil empuje del láser. Para encerrar los átomos en un cuenco óptico se ha de utilizar un láser de gran potencia y enfriar el entorno hasta temperaturas bajísimas, de suerte que los átomos se muevan muy despacio. El láser de dióxido de carbono que empleamos en nuestros experimentos posee una intensidad en el punto focal de dos millones de watt por centímetro cuadrado, más que suficiente para cortar el acero. Pese a tamaña intensidad, el cuenco óptico sólo es capaz de confinar átomos cuya temperatura inicial sea inferior a una milésima de grado por encima del cero absoluto. (Hablando con precisión técnica, los átomos, individualmente considerados, no poseen temperatura *per se*. Pero no cuesta convertir su energía cinética a un equivalente de temperatura, que nos dice la frialdad que debe tener el gas para que permanezca dentro del cuenco óptico).

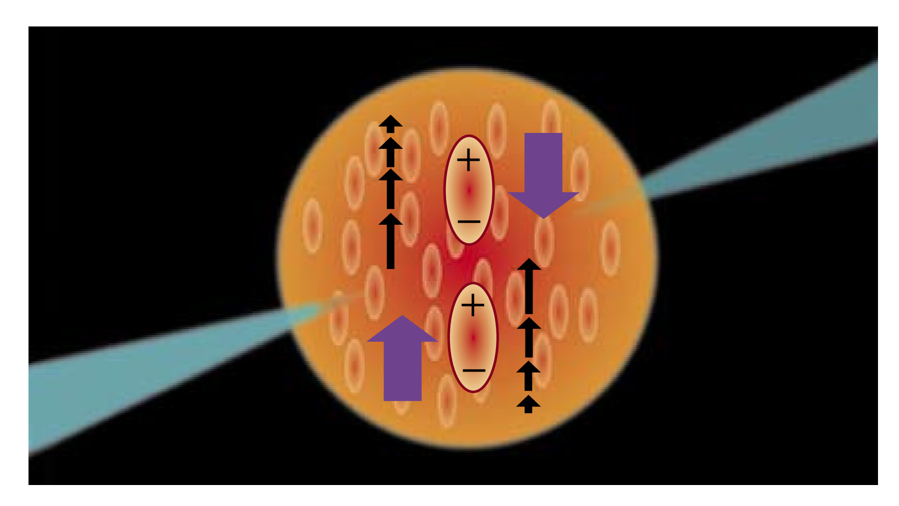
Puesto que los átomos han de estar muy fríos para poder apresarlos con un rayo láser, la creación del cuenco óptico es la segunda parte de un procedimiento que consta de tres. Primero, enfriamos varios cientos de miles de millones de átomos de litio hasta temperaturas de 15 millonésimas de grado por encima del cero absoluto con una trampa magnetoóptica, método hoy ya corriente.

Esa trampa emplea seis rayos láser rojos, ordenados en tres pares ortogonales. Cada par de láseres frena a los átomos de litio en una única dirección mediante el efecto Doppler. Desde la perspectiva de un átomo en movimiento, el rayo láser que se propaga en dirección opuesta parece tener una frecuencia mayor; para el átomo es como un “viento de cara” crecido. Al propio tiempo, el rayo láser que se propaga en la misma dirección que el átomo tendrá, desde



1. **LOS EXPERIMENTOS CON GASES DE FERMI ULTRAFRIOS** ayudan a comprender la física de sistemas extremos; entre ellos el interior de las estrellas de neutrones, como la creada tras la explosión de supernova de la Nebulosa del Cangrejo (*arriba*). Las estrellas de neutrones no se convierten en agujeros negros; lo impide la “presión de Fermi”, consecuencia ésta del principio de exclusión de Pauli.

CORTESIA DEL OBSERVATORIO EUROPEO DEL SUR, *ESO*



2. SE PUEDEN ATRAPAR LOS ATOMOS NEUTROS de una nube de gas enrarecida y fría (*nube naranja*) con un "cuenco óptico", un láser intenso (*azul*) que conduce los átomos hacia su foco. El campo eléctrico oscilante del láser provoca que los núcleos atómicos con carga positiva se separen de los electrones cargados negativamente. Puesto que el campo eléctrico (*flechas negras*) es mayor cerca del foco, la fuerza en el lado positivo del átomo no queda compensada del todo por la fuerza opuesta en el lado negativo. Así, debajo del haz de luz la fuerza ejercida hacia arriba sobre la parte superior del átomo supera ligeramente a la fuerza ejercida hacia abajo sobre su parte inferior. De igual forma, por encima del haz de luz, la fuerza hacia abajo ejercida en la parte inferior del átomo supera a la fuerza hacia arriba sobre la parte superior. Por lo tanto, en todos los casos aparece una fuerza neta (*flechas de color magenta*) que empuja a los átomos hacia el interior.

TOM DUNNE/*American Scientist*

el punto de vista del átomo, una frecuencia menor: un "viento de cola" atenuado. Puesto que estos efectos aumentan con la velocidad del átomo, la luz del láser parecerá actuar como una fuerza viscosa. Esta es la razón por la que uno de los inventores de la trampa magnetoóptica, el premio Nobel Steven Chu, de la Universidad de Stanford, acuñó la muy apropiada expresión "melaza óptica".

Sin estas "melazas", un átomo que entrase en nuestro cuenco óptico lo atravesaría sin más, igual que una canica tirada contra una fina taza de té la agujereará. La trampa magnetoóptica equivale a llenar de miel la taza; la canica llegaría al fondo del cuenco frenada casi del todo. Parecía, pues, que teníamos que poder inactivar las melazas una vez cargado el cuenco óptico y retener en éste los átomos durante mucho tiempo.

Al menos, en teoría. En la práctica, los cuencos ópticos no funcionaron como se esperaba hasta finales de los años noventa, cuando nuestro grupo descubrió el causante de su destrozo. Los átomos oscilan dentro de un cuenco óptico con una frecuencia característica: en nuestros experimentos, oscilan 6600 veces por segundo en la dirección corta y 230 veces por segundo en la larga. (Esta segunda frecuencia resulta menor porque la atracción hacia el centro del cuenco óptico es más débil que en la dirección axial.) Los láseres que se utilizaban no eran estables; presentaban fluctuaciones de intensidad que duplicaban la frecuencia de los átomos en la trampa.

Para hacernos una idea del problema que ello supone, imaginemos un átomo oscilando de lado a lado en un cuenco cuyas paredes vibren hacia dentro y hacia afuera. El movimiento hacia dentro de un lado del cuenco empuja al átomo. Cuando alcanza el otro lado (a la mitad de su período de oscilación), se encuentra con el otro extremo de la pared, que de nuevo se mueve hacia dentro. Y el átomo recibe un nuevo empujón. Una y otra vez las paredes agitan al átomo hacia delante y hacia atrás, hasta echarlo del cuenco en unos segundos.

Resolvimos este problema en 1999 al construir un láser diseñado para operar sin tales oscilaciones de intensidad. Logramos atrapar los átomos durante cinco minutos, un tiempo cientos de veces mayor que en cualquier cuenco óptico anterior. Desde entonces, hemos reemplazado este láser con una unidad comercial sumamente estable y más potente; ahora podemos contener los átomos durante casi siete minutos.

Tras confinar los átomos en el cuenco, aún no están lo suficientemente fríos para que sucedan los fenómenos cuánticos. Hay que enfriar aún más en el tercer y último paso: el enfriamiento por evaporación. No existe nada extraño en este proceso; está inspirado en la manera en que se enfría una sopa. Cuando chocan dos átomos, en ocasiones consiguen unir sus energías y uno de ellos gana el ímpetu necesario para escapar de la trampa o "evaporarse". El otro se frena. Entonces colisiona con otros átomos de la trampa, enfriándolos, y el proceso continúa. Con el tiempo, los átomos están tan enfriados, que incluso dos de ellos juntos no suman la energía necesaria para que uno escape. En este punto finaliza la evaporación y se estanca el enfriamiento. Para solventar el nuevo contratiempo, disminuimos poco a poco la intensidad del rayo láser atrapador: bajamos los bordes del cuenco óptico. De ese modo, algunos de los átomos más calientes puedan escapar. Así perdemos una tercera parte de los átomos, pero los que quedan están tan fríos, que forman el gas de Fermi degenerado.

Efectos cuánticos

Según la mecánica cuántica, la materia exhibe propiedades de partícula y de onda. Cuando a una partícula, un electrón o un átomo completo, se la considera una onda, se dice que tiene asociada una "longitud de onda de De Broglie", que determina el "tamaño" efectivo de la partícula. La longitud de onda de De Broglie varía con la inversa del momento. Al aumentar el momento, como ocurre en un acelerador de partículas, la onda se hace muy pequeña. (Por eso se necesitan aceleradores de partículas para explorar los diminutos componentes de los átomos.) Con un momento muy pequeño —es el caso de nuestra trampa óptica—, el átomo se expande como un globo. A estas temperaturas tan bajas, el globo tiene un diámetro de casi una micra, tamaño resoluble con un buen microscopio.

Si la longitud de onda de De Broglie crece demasiado, los glo-

bos empezarán a tocarse e intentarán solaparse. En este momento, el gas recibe el nombre de "degenerado"; su comportamiento no viene gobernado por las leyes de la física clásica, sino por las reglas cuánticas.

El Yin y el Yang

Desde los años treinta, se sabe que las partículas cuánticas se agrupan en dos categorías: bosones y fermiones. Los bosones idénticos son partículas gregarias: prefieren ocupar los mismos estados de energía que sus vecinos. Esa es la naturaleza de los fotones (las partículas de la luz); se ve en los láseres, donde los fotones de una determinada energía estimulan a los átomos para que emitan más fotones de la misma energía.

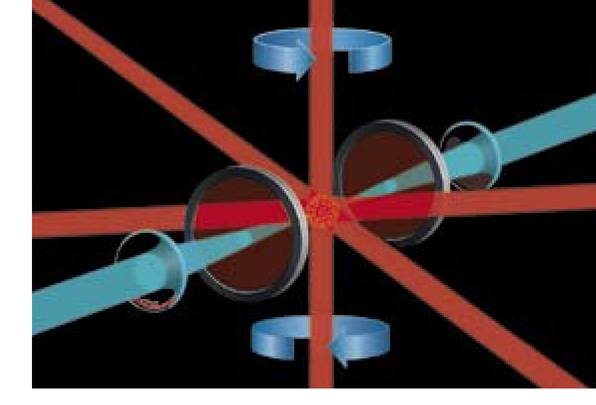
Las partículas de las que está compuesta la materia común —los protones, electrones y neutrones— son fermiones. Su comportamiento difiere mucho del de los bosones. Tal y como Enrico Fermi y P. A. M. Dirac descubrieron, estas partículas rehúyen la compañía. Dos fermiones con el mismo "espín" no pueden ocupar el mismo nivel de energía ni la misma región del espacio. (El "espín" de una partícula guarda relación con la orientación de ésta en un campo magnético. Hay espín hacia arriba y espín hacia abajo.) Este comportamiento presenta consecuencias de peso en la vida cotidiana. Explica la tabla periódica de los elementos. La segunda fila de la tabla periódica, por ejemplo, cuenta con ocho elementos porque la segunda capa electrónica de los átomos tiene otros tantos huecos para los electrones. Dos electrones nunca pueden ocupar el mismo hueco, porque son fermiones.

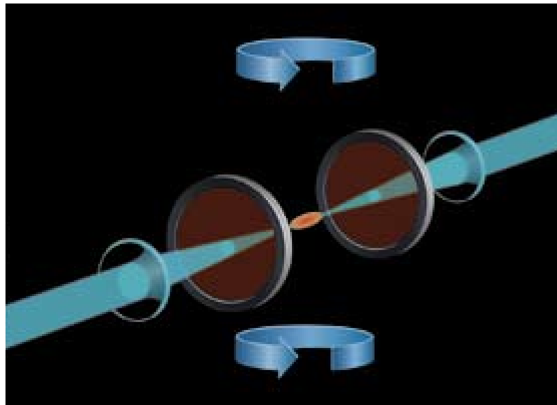
Las partículas compuestas, entre ellas los átomos y las moléculas, actúan como fermiones si están formadas por un número impar de fermiones, y como bosones si contienen un número par. Por tanto, el ^{6}litio, con tres protones, tres neutrones y tres electrones, es un fermión compuesto, mientras que el ^{7}litio, que cuenta con un neutrón más, es un bosón compuesto. A temperaturas corrientes, los dos isótopos presentan propiedades químicas similares, pero a temperaturas ultrabajas salen a luz sus diferentes personalidades cuánticas.

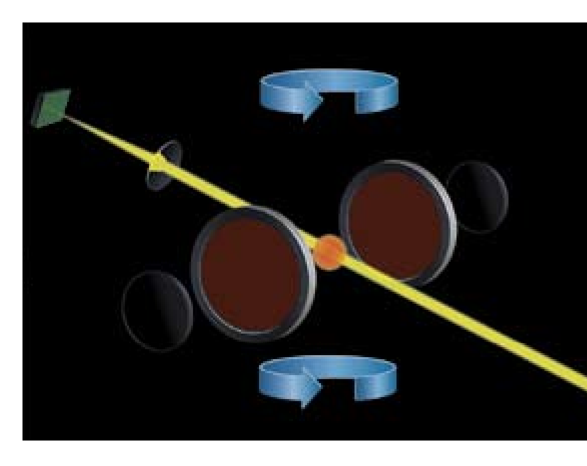
Cuando un gas de bosones compuestos, así uno de ^{7}litio, se enfría en un cuenco óptico, ocurre una rápida transición en el momento de la degeneración (la "temperatura de transición"). De repente, el gas cambia de clásico, con los átomos en varios niveles de energía, a gas en el que todos los átomos tienen la misma energía, la menor permitida por el contenedor. Es decir, todos los átomos oscilan con la mínima energía y la mayor longitud de onda posibles. Vibran al unísono, como si fueran un átomo enorme: un condensado de Bose-Einstein.

Cuando un gas de fermiones compuestos, por ejemplo uno de ^{6}litio, se enfría hasta la temperatura de transición (llamada "temperatura de Fermi" en el caso de los fermiones), ocurre una transformación diferente: los átomos se agrupan por sí mismos de manera muy organizada; dos están en el mínimo estado energético permitido, otros dos en el siguiente estado de menor energía, y así sucesivamente, como si fueran electrones de un átomo regular. El resultado final es un gas de Fermi degenerado.

Poco después de que Cornell y Wieman crearan el primer condensado de Bose-Einstein, se intentó producir un gas atómico degenerado de Fermi. (Recuérdese que los gases de Fermi degenerados de electrones ya se conocían, en cualquier metal conductor.) En 1999 Deborah Jin, de la Universidad de Colorado, lo logró con potasio-40 y una versión modificada de las trampas magnéticas de Cornell y Wieman. Por desgracia, el método de Jin no es aplicable a todos los átomos. A otros grupos de investigadores les llevó más tiempo desarrollar técnicas

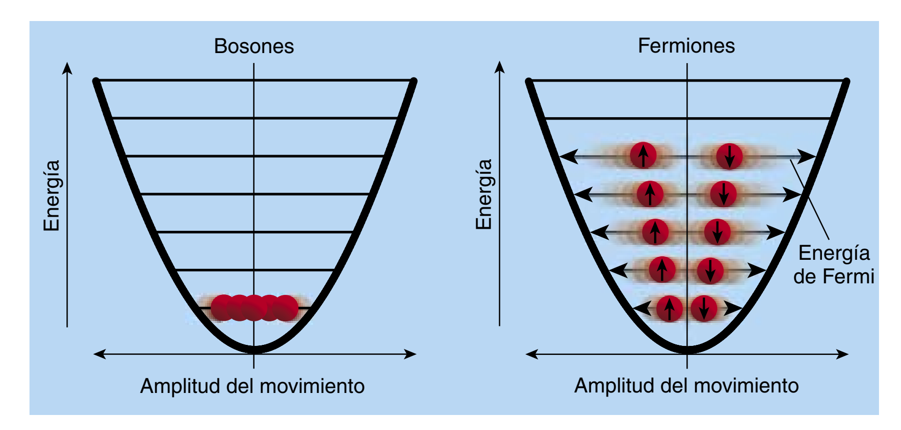






3. LA CREACION Y ESTUDIO POSTERIOR de un gas de Fermi degenerado comienzan con una nube de átomos de litio, a los que se frena con seis rayos láser dirigidos hacia el interior de una trampa magnetoóptica (*líneas rojas en el diagrama superior*), donde se genera una "melaza óptica". (Las flechas azules en forma de anillos indican la dirección de la corriente en dos parejas de bobinas adyacentes, generadoras de un campo magnético.) Una vez que los átomos se han enfriado a 150 millonésimas de grado por encima del cero absoluto, quedan confinados en el "cuenco óptico" por un haz láser enfocado (*verde*). Puesto que la fuerza es mayor en la dirección perpendicular al haz que en la longitudinal, el cuenco produce una nube de átomos con forma de puro (*centro*). Al disminuir poco a poco la intensidad del láser, algunos de los átomos se escapan, enfriando los que quedan hasta 50 milmillonésimas de grado por encima del cero absoluto. El gas está "degenerado" a esta temperatura: se trata de un estado muy organizado, que se comporta como un átomo supergigante. Los autores estudiaron este fenómeno apagando el láser que creaba el cuenco óptico, con lo que el gas se expandía. Obtuvieron una secuencia de imágenes de la evolución de la nube mediante pulsos cortos de luz de láser (*amarillo en la imagen de abajo*) que atraviesa el gas antes de incidir en una cámara (*verde*). El comportamiento de la nube durante la expansión "recuerda" su pasado de gas de Fermi degenerado.

TOM DUNNE/*American Scientist*



4. TODOS LOS ATOMOS DE UN CONDENSADO DE BOSE-EINSTEIN se encuentran en el mismo nivel de energía, el mínimo disponible (*izquierda*). En un gas de Fermi degenerado, en cambio, sólo dos átomos (con espín nuclear opuesto) pueden compartir el mismo nivel de energía (*derecha*). En virtud de ello, los átomos de este gas se distribuyen en una serie de niveles energéticos, hasta alcanzar el nivel correspondiente a la temperatura de Fermi. Cuanto mayor sea el nivel de energía del átomo, más amplio resultará el movimiento oscilatorio dentro de la trampa.

generales. En el año 2001, los equipos de Randy Hulet, de la Universidad Rice, de Christophe Salomon, de la Escuela Superior Normal francesa, y de Ketterle, del MIT, consiguieron el objetivo enfriando los fermiones con bosones encerrados dentro de la misma trampa magnética. Hulet y Salomon demostraron que el gas de fermiones de litio-6 ocupa un volumen mucho mayor que el litio-7 bosónico. Esta diferencia procede de que los fermiones hayan de ocupar niveles distintos de energía; algunos deben entonces moverse en órbitas de gran radio, mientras que los bosones se agrupan en el estado de menor energía y gozan de un pequeño radio de movimiento.

Al mismo tiempo, nuestro equipo de la Universidad de Duke también creó gases de Fermi degenerados cuya temperatura no llegaba ni a una décima de la temperatura de Fermi. Utilizamos métodos de enfriamiento exclusivamente ópticos. Estos gases muy degenerados son bastante estables y exhiben propiedades espectaculares en cuanto se los somete a “interacciones fuertes” como las que mencionamos en la introducción.

La magia de las interacciones fuertes

En un gas común, los choques entre átomos escasean mucho y duran muy poco, de ahí que en los átomos no influyan en gran medida sus vecinos. Este no es el caso de los gases de Fermi con interacciones fuertes degenerados, donde los átomos se empujan unos a otros y se encuentran casi en un estado de colisión constante.

La palabra “colisión” o “choque” es quizás un tanto drástica para describir el comportamiento de estos gases. Se suele emplear el término “interacción”, más neutro. Pero no se deben confundir estas interacciones de gran distancia con las fuerzas clásicas. Una interacción ocurre cuando dos partículas intentan compartir el mismo estado real de energía; o bien lo hacen amigablemente (como es el caso de los bosones), o luchan por ello (el caso de los fermiones). La distancia a la cual las partículas “notan” la presencia de otras partículas se denomina longitud de dispersión. Se dice que una interacción es fuerte si su longitud de dispersión es grande. En los últimos años, se ha demostrado que resulta posible cambiar la longitud de dispersión mediante la aplicación de campos magnéticos, aumentarla cuanto se necesite e incluso cambiar su signo, de atractiva a repulsiva.

¿Por qué resulta posible? Para empezar, nuestro gas de Fermi degenerado contiene en realidad dos poblaciones de fermiones, una con el espín hacia arriba y otra con el espín hacia abajo. La prohibición de que dos fermiones ocupen el mismo espacio no se aplica a fermiones con espín opuesto. Por lo normal, los átomos de litio-6 con espín opuesto no perciben la existencia de los otros; su longitud de dispersión es casi nula.

Cuando aplicamos un campo magnético, cambia la energía magnética interna del átomo, que actúa como una barra imanada. Si la energía total de una pareja de átomos de espín opuesto coincide con la de una molécula diatómica, los átomos interactúan fuertemente. En cierto sentido, el campo magnético engaña a los átomos; les lleva a creer que se encuentran en una molécula. Este fenómeno se denomina “resonancia de Feshbach” en honor del físico del MIT Herman Feshbach, que lo predijo. Cuando el campo magnético se ajusta correctamente, los átomos sienten la presencia de otros átomos que, desde un punto de vista atómico, se encuentran a distancias enormes.

Mas, ¿cuán enorme? La longitud de onda de De Broglie impone una limitación: si dos átomos están más separados que la longitud de De Broglie, no se influirán mutuamente; sería como dos globos que pasaran el uno junto al otro sin tocarse. En un gas de Fermi, la longitud de dispersión no puede superar la longitud de onda de De Broglie, que a su vez no debe ser mayor que el espacio entre partículas (para evitar que algunos fermiones de mismo espín se solapen).

Pero a temperaturas muy frías, la longitud de onda de De Broglie crece hasta coincidir con el espacio entre átomos. Además, cuando se ajusta de manera conveniente el campo magnético, la resonancia de Feshbach dilata la longitud de dispersión hasta su máximo valor posible: la longitud de onda de De Broglie. Por lo tanto, cuando se combinan las temperaturas ultrabajas con un campo magnético bien ajustado, la longitud de dispersión, la longitud de onda de De Broglie y el espacio entre partículas valen lo mismo.

Nuestro equipo fue el primero en observar el curioso fenómeno que ocurre cuando se prepara un gas de estas características y a continuación se elimina el contenedor apagando el cuenco óptico. Al principio, el gas atómico atrapado presenta la misma forma que el cuenco óptico: un puro largo, estrecho y fino. Al liberarse los átomos, el gas se expande radialmente (en la dirección estrecha del puro)



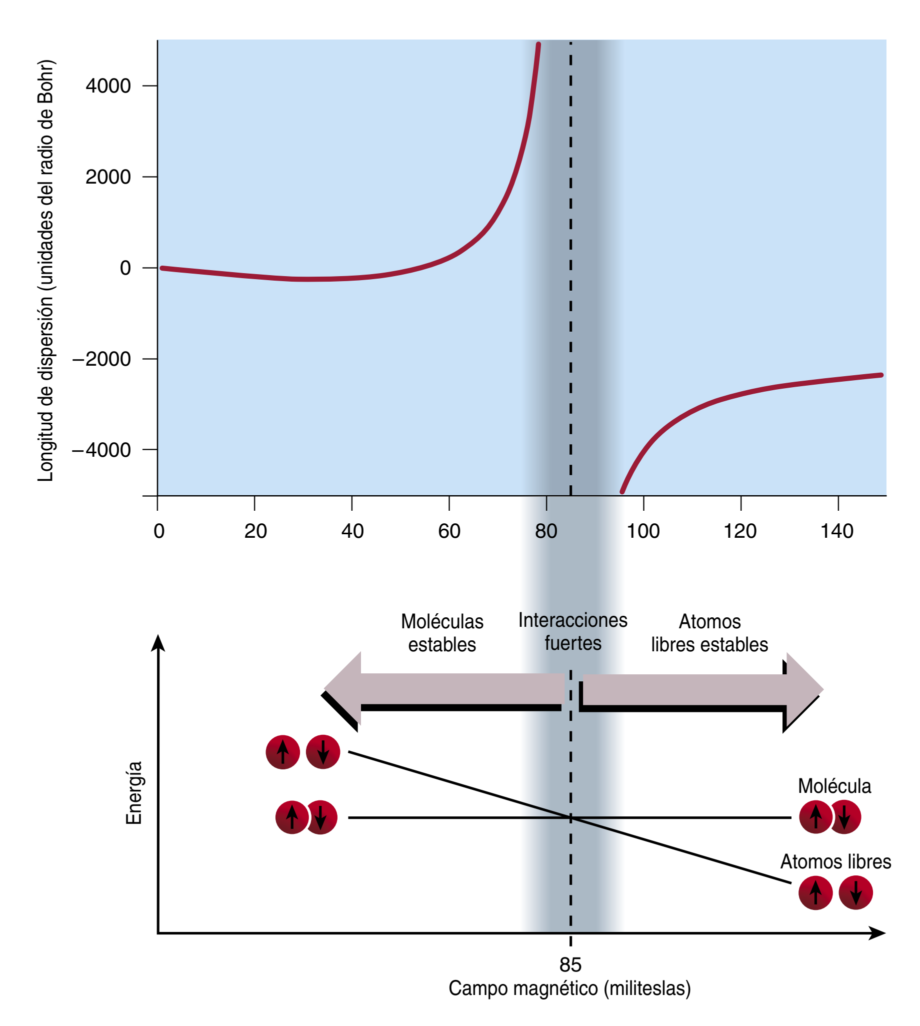
mientras permanece casi inmóvil en la dirección axial (la dirección larga del puro). Es una consecuencia de las fuerzas de presión que sufre el gas: cada pequeña porción gaseosa es impelida hacia fuera por la presión del gas de atrás y hacia dentro por la presión del gas que tiene delante. Es decir, el gradiente de presiones determina la fuerza hacia fuera, que es mayor en las direcciones radiales del puro. En un gas común, los átomos dejan de ejercer una presión mutua en cuanto hallan una vía de escape. Pero en nuestro gas de Fermi con interacciones fuertes, los propios átomos (en realidad sus "globos" cuánticos) continúan expandiéndose hasta medir tanto como el espacio que hay entre ellos; el gradiente de presiones persiste, pues, durante bastante tiempo. Esta metamorfosis sigue produciéndose incluso cuando el gas deja de interactuar, porque, mientras los átomos se muevan libremente, su velocidad radial será mayor que la axial. La nube gaseosa se expande mucho más deprisa radialmente que longitudinalmente; su forma cambia, de puro a calabaza.

Debido a las interacciones fuertes, los gases de Fermi degenerados exhiben también "comportamiento universal". Valen así de modelo de muchos otros sistemas físicos naturales. "Universal" significa aquí que todos los sistemas de Fermi con interacciones fuertes (cualquier sistema cuya longitud de dispersión coincida con la separación entre partículas) se comportan de forma análoga. No importa que los fermiones sean átomos, electrones, quarks o cualquier otra cosa. La manera en que estos sistemas, tomados en su conjunto, interaccionan es siempre similar. Por esta razón, el gas de Fermi degenerado de nuestro laboratorio sirve de modelo experimental para investigar las últimas teorías sobre los quarks o las estrellas de neutrones. La transformación morfológica que observamos en nuestro gas recuerda mucho al comportamiento dinámico que se les ha predicho hace poco a los plasmas de quarks y gluones.

Hemos intentado también determinar con experimentos la "energía neta de interacción" de un gas de Fermi con interacciones fuertes, es decir, la energía total de atracción o repulsión de una partícula sobre todas las que estén en su radio de alcance. Se puede demostrar que en un sistema universal esta cantidad es proporcional a la energía cinética media de las partículas.

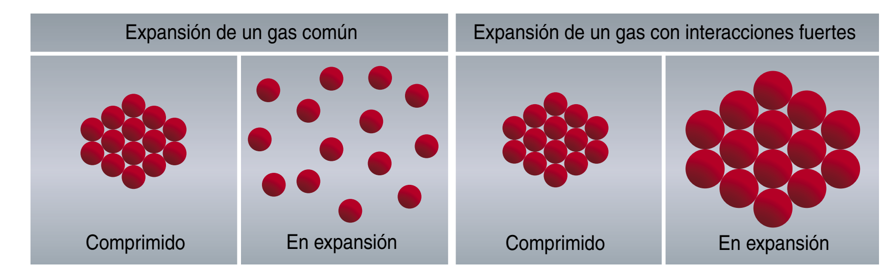
De la constante de proporcionalidad, beta, depende la estabilidad mecánica del sistema. La energía cinética da lugar a una repulsión entre los fermiones interactivos, la presión de Fermi, que, al tender a separarlos, libra a las estrellas de neutrones del colapso gravitatorio y da estabilidad mecánica a nuestro gas atrapado. Pero la energía neta de interacción también es fuente de una presión, que puede empujar hacia dentro o hacia fuera en razón del signo de la constante de proporcionalidad. Si beta fuera menor que –1, la presión hacia el interior debida a la energía de interacción sería mayor que la presión de Fermi hacia fuera, y el sistema se hundiría sobre sí mismo.

Los físicos nucleares han venido batallando durante treinta años para calcular beta. La complejidad de esta tarea se debe a que requiere calcular interacciones donde participan mu-



5. LA RESONANCIA DE FESHBACH altera el comportamiento de un gas de Fermi degenerado. A ese fenómeno se debe que la distancia a la cual los átomos influyen unos sobre otros —la "longitud de dispersión"— aumente drásticamente cuando se aplica un campo magnético de una intensidad determinada (*arriba*). (Una longitud de dispersión positiva significa repulsión; negativa significa atracción.) En el caso de los átomos de litio-6, la resonancia de Feshbach ocurre a la intensidad de 85 militeslas. En un campo magnético menos intenso, la molécula posee una energía menor que una pareja de átomos libres. Un campo magnético más intenso favorece energéticamente a los átomos libres (*abajo*). Cerca de la resonancia, los átomos libres y los que están ligados en moléculas se comportan de forma análoga; eso explica el aumento sustancial de la longitud de dispersión, o lo que los físicos denominan "interacciones fuertes".

TOM DUNNE/*American Scientist*



6. EL COMPORTAMIENTO DE LOS GASES DE FERMI con interacciones fuertes cuando se expanden difiere del comportamiento de los gases normales. En un gas común, los átomos, una vez que se han liberado de un estado de compresión, rara vez interaccionan entre sí. En un gas de Fermi, oscilan dentro de "globos cuánticos", que se expanden a la vez que la separación atómica. En consecuencia, los átomos siguen ejerciendo una mutua presión de Fermi, interacción que opera a largas distancias.

chas partículas. La mejor estimación teórica se cifra en torno a –0,5. Es decir, la energía neta de interacción debería aplicar una fuerza hacia dentro cuya intensidad fuera la mitad de la ejercida por la fuerza expansiva de la presión de Fermi. Ello resulta coherente con la manifiesta estabilidad de las estrellas de neutrones. Ni que decir tiene que no se puede raspar un trozo de una estrella de neutrones y comprobar si ese valor es exactamente –0,5. Pero ahora hemos medido beta en nuestro laboratorio. Rudolf Grimm, de la Universidad de Innsbruck, y Salomon han efectuado después mediciones parecidas.

Nuestros primeros experimentos han determinado que beta vale –0,26. Hace poco, Salomon ha obtenido un valor de –0,3 a una temperatura superior, y Grimm ha medido valores más próximos a –0,5. Es demasiado temprano para alcanzar un veredicto final, puesto que tanto los experimentos como los cálculos teóricos pueden adolecer de errores sistemáticos. Alienta la semejanza de todas las mediciones: se parecen tanto, que experimentadores y teóricos tendrán de qué hablar durante los próximos años.

La búsqueda de la superfluidez

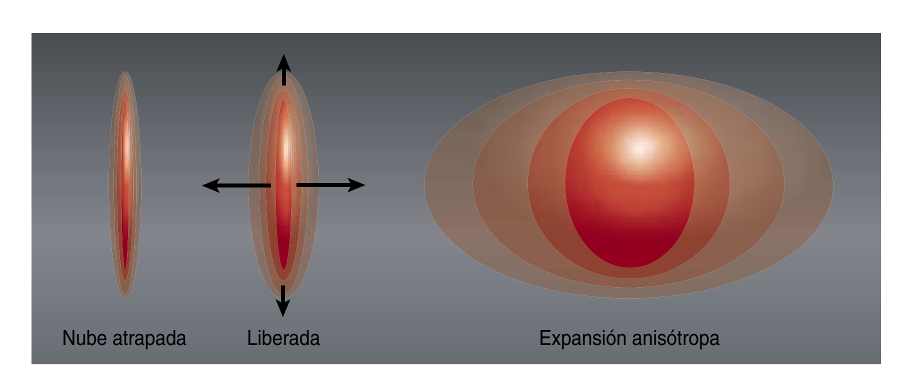
Sandro Stringari, teórico de la Universidad de Trento, predijo el fenómeno del cambio de forma de los gases de Fermi con interacciones fuertes degenerados; lo hizo en 2002, antes de que se hubiese producido uno. Sostuvo, además, que esa metamorfosis quizá fuese una señal de superfluidez.

Los superfluidos, descubiertos en los años treinta, cursan sin ninguna fricción, como los electrones de los materiales superconductores, que experimentan una resistencia nula. Los cables superconductores serían muy útiles, en especial para transmitir electricidad a largas distancias sin perder energía. En la práctica, sin embargo, los superconductores comunes sólo operan a temperaturas de unos pocos grados por encima del cero absoluto. Incluso los superconductores de "alta temperatura", conocidos desde los años ochenta, han de enfriarse hasta la temperatura del nitrógeno líquido. La búsqueda de un superconductor operativo a temperatura ambiente constituye uno de los sueños de la física de la materia condensada.

Los átomos de un superfluido imitan a los electrones de un superconductor; por esa razón, los gases de Fermi degenerados suponen una buena ayuda en esa búsqueda. Desde hace cincuenta años se sabe que los conductores se convierten en superconductores cuando los electrones de espín opuesto se emparejan y fluyen juntos a través de la red atómica. De forma análoga, un líquido de fermiones, de helio-3 por ejemplo, se convierte en un superfluido cuando los átomos forman parejas. Estas asociaciones débiles, no tan intensas como los enlaces moleculares, se denominan pares de Cooper.

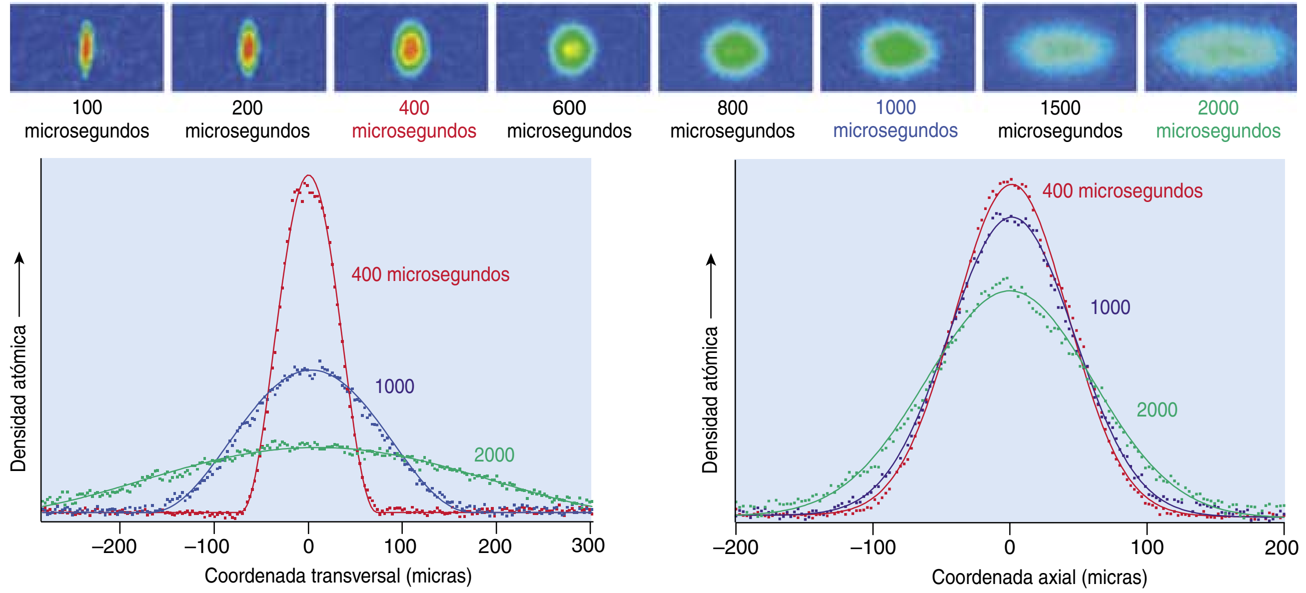
En todos los superconductores conocidos, los pares de Cooper son estables sólo a temperaturas muy inferiores a la de Fermi: a temperaturas de entre 10 y 100 grados por encima del cero absoluto, una milésima o una centésima de la de Fermi. (La temperatura de Fermi de un metal —entendido como un gas de Fermi degenerado— resulta tan elevada porque contiene muchos electrones, muchos fermiones pues. Por ello, todos los niveles de energía se hallan ocupados hasta una energía muy alta. Los electrones más energéticos, los que se encuentran en la banda de conducción, tienen equivalentes de temperatura de diez mil grados).

Recientemente, tres grupos teóricos han predicho que los gases de Fermi con interacciones fuertes degenerados se convierten en superfluidos a temperaturas de hasta la mitad de la temperatura de Fermi. Si la teoría anda en lo cierto, estos sistemas producirían los pares de

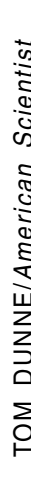


7. LA TEORIA PREDICE QUE LOS GASES DE FERMI con interacciones fuertes se expanden de manera anisótropa, una vez liberados de una trampa óptica. La presión disminuye más deprisa en la dirección radial hacia fuera de la nube elongada; por ello, el gas se expande a mayor velocidad en esa dirección que a lo largo del eje (*flechas negras*). En consecuencia, cambia de forma con el tiempo, de puro (*izquierda*) a calabaza (*derecha*). La presencia de esta expansión con cambio de forma revela la existencia de interacciones fuertes y, quizá, de superfluidez.

TOM DUNNE/*American Scientist*



8. LOS DATOS DE LOS EXPERIMENTOS confirman la expansión anisótropa de la nube de gas de átomos de litio-6. La secuencia de imágenes muestra el cambio de forma y densidad de la nube de gas a medida que se calienta. El gas sigue siendo degenerado y con interacciones fuertes durante al menos 400 microsegundos tras el momento en que se lo libera (*se muestra en las tres primeras imágenes*). Después de esos 400 microsegundos, la alta velocidad inicial de los átomos hace que la nube siga cambiando de forma, aunque los átomos hayan dejado de interaccionar. Las mediciones cuantitativas de estas imágenes demuestran que la expansión es más rápida en el eje radial de la nube (*gráfica de la izquierda*) que en el longitudinal (*gráfica de la derecha*).



Cooper de mayor temperatura que se conocen en física; donde mayor debe reputarse en cuanto fracción de la temperatura de Fermi. Varios equipos, incluido el nuestro, han creado gases degenerados a temperaturas del orden de una décima de la temperatura de Fermi. Quizá hayamos conseguido así ya superfluidos de alta temperatura. Sin embargo, no existen pruebas experimentales sólidas que lo ratifiquen.

Parecerá engañoso hablar de un superfluido de “alta temperatura” cuando en realidad su temperatura es menor que una millonésima de grado por encima del cero absoluto. Pero no lo es. Pensemos en la siguiente analogía. Cuando se proyecta un nuevo avión, se empieza por unos esquemas sobre el papel y unos modelos a escala, y se llega a construir un prototipo. En nuestro caso, vale como “esquema sobre el papel” el concepto de sistema universal de Fermi. El “modelo a escala” es el gas de Fermi con interacciones fuertes degenerado. Está a escala tanto en la temperatura como en el tamaño físico. El principio universal establece que el cambio de escala no modifica las propiedades fundamentales del sistema. Si el modelo a escala no funcionara, tendríamos razones para sospechar que los pares de Cooper no se pueden formar a la temperatura de Fermi. Pero si el modelo funciona —si puede haber pares de Cooper a temperaturas que sean una fracción sustancial de la de Fermi—, podría suceder lo mismo con un conductor. Cabe dentro de lo verosímil que algún día se creen materiales que superconduzcan incluso a dos mil grados o más: no ya a temperatura ambiente, sino a temperaturas mucho mayores.

De cualquier modo, creer que habrá superconductores calientes en un futuro cercano es soñar demasiado. Esperemos, al menos, que los nuevos resultados obtenidos de los trabajos con gases de Fermi degenerados nos lleven hasta los materiales superconductores de muy alta temperatura.

Los autores

John E. Thomas, “profesor distinguido Fritz London de física” de la Universidad Duke, pertenece a la Sociedad Americana de Física. **Michael E. Gehm** obtuvo su doctorado en física en el año 2003 mientras trabajaba en el equipo de investigación de Thomas. Actualmente disfruta de una plaza postdoctoral en el Centro Fitzpatrick de Sistemas Fotónicos y de Comunicaciones de la Universidad Duke.

Bibliografía complementaria

OPTICAL DIPOLE TRAPS FOR NEUTRAL ATOMS. R. Grimm, M. Weidemüller e Y. B. Ovchinnikov en *Advances in Atomic, Molecular & Optical Physics*, vol. 42, págs. 95-165; 2000.

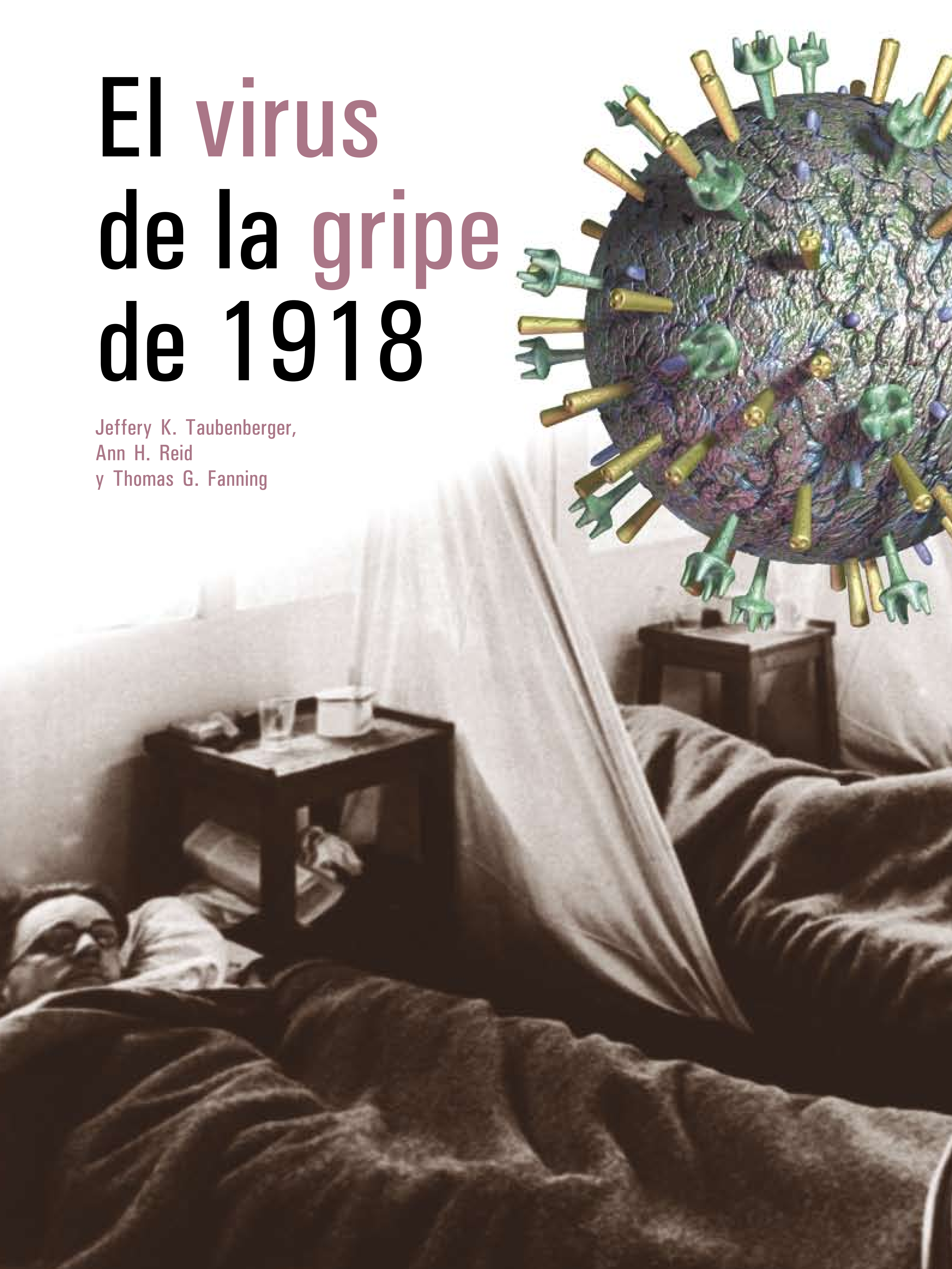
OBSERVATION OF FERMI PRESSURE IN A GAS OF TRAPPED ATOMS. A. G. Truscott, K. E. Strecker, W. I. McAlexander, G. B. Partridge y R. G. Hulet en *Science*, vol. 291, págs. 2570-2572; 2001.

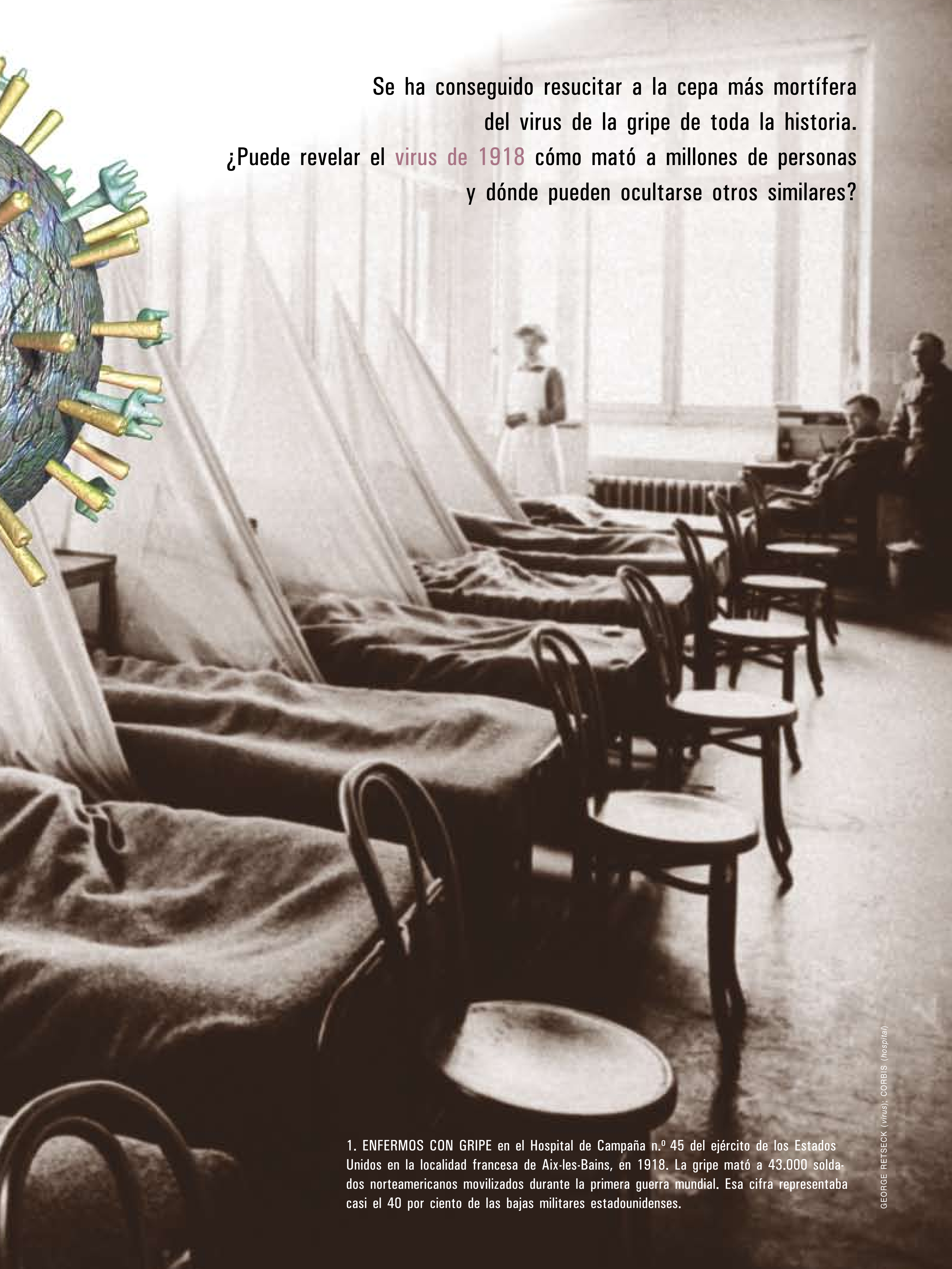
ALL-OPTICAL PRODUCTION OF A DEGENERATE FERMI GAS. S. R. Granade, M. E. Gehm, K. M. O’Hara y J. E. Thomas en *Physical Review Letters*, vol. 88, pág. 120405; 2002.

OBSERVATION OF A STRONGLY INTERACTING DEGENERATE FERMI GAS OF ATOMS. K. M. O’Hara, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, S. R. Granade y J. E. Thomas en *Science*, vol. 298, págs. 2179-2182; 2002.

El virus de la gripe de 1918

Jeffery K. Taubenberger,
Ann H. Reid
y Thomas G. Fanning





Se ha conseguido resucitar a la cepa más mortífera del virus de la gripe de toda la historia. ¿Puede revelar el virus de 1918 cómo mató a millones de personas y dónde pueden ocultarse otros similares?

1. ENFERMOS CON GRIPE en el Hospital de Campaña n.º 45 del ejército de los Estados Unidos en la localidad francesa de Aix-les-Bains, en 1918. La gripe mató a 43.000 soldados norteamericanos movilizados durante la primera guerra mundial. Esa cifra representaba casi el 40 por ciento de las bajas militares estadounidenses.

GEORGE RETSECK (*virus*); CORBIS (*hospital*)

El 7 de septiembre de 1918, en los momentos más críticos de la primera guerra mundial, un soldado de un campo de entrenamiento situado a las afueras de Boston cayó enfermo con fiebre elevada. Los médicos le diagnosticaron una meningitis, pero cambiaron de opinión al día siguiente, cuando una docena de soldados fueron hospitalizados con síntomas respiratorios. El día 16 se declararon 36 nuevos casos de aquella enfermedad desconocida. Sorprendentemente, el 23 de septiembre se habían declarado 12.604 casos en un campamento de 45.000 soldados. Al final del brote, una tercera parte de la población del campo había enfermado de esta grave dolencia y, de ellos, casi 800 murieron. A menudo, los soldados fallecidos presentaban una coloración azulada de la piel y, antes de morir por asfixia, padecieron terribles sufrimientos. Muchos fallecieron apenas 48 horas después de presentar los primeros síntomas; en la autopsia sus pulmones aparecieron repletos de líquido o sangre.

El conjunto de síntomas no guardaba relación con ninguna enfermedad conocida. William Henry Welch, reputado patólogo de la época, supuso que "debe ser alguna nueva clase de infección o plaga". La enfermedad no era una plaga ni ningún agente nuevo: se trataba de la gripe. Aquella cepa del virus de la gripe, especialmente virulenta e infecciosa, mató a unos 40 millones de personas en todo el mundo entre 1918 y 1919.

El brote de gripe más mortífero de la historia moderna desapareció con la misma celeridad con que se presentó. Durante largo tiempo se creyó que su agente causal se había perdido. Nadie conservó muestras del patógeno para estudios posteriores, pues no se supo que era un virus hasta los años treinta. Pero gracias a la previsión del Museo Médico del Ejército de los Estados Unidos, a la perseverancia del patólogo Johan Hultin y a los avances del análisis genético de muestras antiguas de tejido, se consiguió recuperar partes del virus de 1918 y estudiar sus características. Ahora, después de más de 80 años de la terrible catástrofe de 1918-1919, las muestras de tejido recogidas de víctimas arrojan luz sobre la naturaleza de esa cepa pandémica y sobre la actividad de los virus de la gripe en general.

Pero no es la mera curiosidad histórica lo que motiva la investigación. Los virus de la gripe evolucionan sin cesar. Nuevas cepas atacan una y otra vez a la población. Desde 1918, se han desarrollado cepas pandémicas del virus de la gripe en dos ocasiones: en 1957 y en 1968. Asimismo, cepas que acostumbran infectar sólo animales, han atacado de vez en cuando al hombre; recuérdese el reciente brote de gripe aviar en Asia. Nos hemos propuesto un doble objetivo; primero, descubrir en virtud de qué el virus de 1918 adquirió tal virulencia, lo que nos permitiría desarrollar tratamientos y medidas preventivas antigripales; segundo, establecer el origen de los virus pandémicos, para identificar posibles fuentes de futuras cepas pandémicas.


2. ENFERMERAS DE LA CRUZ ROJA transportan a un enfermo de gripe en 1918 en St. Louis. El personal sanitario, los policías y la gente de la calle, aterrorizados, llevaban mascarillas para protegerse del virus que asolaba el país. Aproximadamente la tercera parte de la población estadounidense resultó infectada durante la pandemia y murieron 675.000 personas.

MUSEO AMERICANO DE LA CRUZ ROJA

Resumen/El misterio de 1918

- La pandemia de gripe que asoló el planeta entre 1918 y 1919 tuvo un carácter excepcional por el ingente número de víctimas, sobre todo jóvenes, que sucumbieron ante un virus de la gripe de letalidad insólita.
- Durante largo tiempo permaneció envuelta en el misterio la razón de tamaña virulencia. Hasta que los autores desarrollaron técnicas que permitieron recuperar genes del virus 1918 a partir de tejidos conservados de víctimas de la pandemia.
- El análisis de estos genes y de las proteínas que codifican ha revelado algunas características del virus que suprimirían las defensas inmunitarias y, a un mismo tiempo, instarían una violenta respuesta inmunitaria en las víctimas, lo que contribuiría a su elevada mortalidad.
- Seguimos sin conocer el origen del virus pandémico. Los autores rechazan que procediera de los huéspedes aviares y mamíferos conocidos.

La caza del virus 1918

En muchos aspectos, la pandemia de gripe de 1918 fue similar a otras anteriores y posteriores a ella. Cuando aparece una cepa nueva del virus de la gripe con la que el sistema inmunitario de la mayoría de la gente no ha tenido contacto, lo más probable es que se propague un brote de la enfermedad. Sin embargo, un halo de misterio rodeó durante largo tiempo a determinadas características de la pandemia de 1918.

Resultaron singulares su comienzo y su final. El brote cruzó Europa y Norteamérica y alcanzó lugares remotos (tierras vírgenes de Alaska y las

islas del Pacífico). Cuando se extinguió, una tercera parte de la población mundial había padecido la infección. Destacó, asimismo, la gravedad de la enfermedad, con tasas de mortalidad entre el 2,5 y el 5 por ciento, más de cincuenta veces la mortalidad producida por otras epidemias de gripe.

En el otoño de 1918, Europa entera llamaba a la enfermedad la gripe "española", quizá porque España, neutral en el conflicto, no impuso la censura de guerra para las noticias sobre la epidemia prevalente en los países combatientes. Con tal denominación se quedó para la historia, por más que el primer brote, la ola de primavera de la epidemia, se originara, al parecer, en los cuarteles militares estadounidenses en marzo de 1918. El segundo brote, la ola principal de la pandemia global, tuvo lugar de septiembre a noviembre de ese mismo año. Hubo, en numerosas zonas, una tercera ola, muy grave, a principios de 1919.

Aún no se habían descubierto los antibióticos. En su mayoría, la gente que murió durante la pandemia lo hizo por neumonía causada por bacterias oportunistas que infectaron a quienes la gripe había ya debilitado. Sin embargo, una parte de los afectados por la epidemia murieron apenas unos días después de que se les manifestaran los síntomas de la enfermedad, víctimas de una neumonía vírica más grave, originada por la misma gripe, que dejó sus pulmones completamente encharcados de sangre o líquido. Además, la mayoría de los fallecidos eran adultos jóvenes de entre 15 y 35 años, un grupo poblacional que rara vez muere de gripe. Llama la atención que los menores de 65 años representaron más del 99 por ciento de todas las muertes por gripe supernumerarias (las que se encuentran por encima de la tasa anual normal), entre 1918 y 1919.

Los primeros pasos para comprender la causa de la pandemia de 1918 y sus características excepcionales comenzaron apenas llegó a su fin, pero el virus culpable permaneció oculto durante casi ocho décadas. En 1951, investigadores de la Universidad de Iowa, entre los que se encontraba Johan Hulting, un estudiante de doctorado recién llegado de Suecia, viajaron a la lejana península de Seward, en Alaska, en busca de la cepa de 1918. En noviembre de 1918, la epidemia se extendió durante cinco días por una aldea de pescadores inuit. En la localidad, conocida hoy por Brevig Mission, ocasionó la muerte a 72 personas, alrededor del 85 por ciento de la población adulta. Puesto que sus cuerpos fueron enterrados en el permafrost, esperaban los expedicionarios de 1951 encontrar el virus de 1918 conservado en los pulmones de las víctimas. Mas, para su infortunio, fracasaron todos los intentos por cultivar virus de la gripe vivos a partir de las muestras recogidas.

En 1995, otro grupo buscó el virus de 1918 en otra fuente de tejidos: las muestras de autopsias archivadas que se conservan en el Instituto de Patología del Ejército (AFIP) en Washington D.C. Durante varios años, habíamos adquirido experiencia en extraer, con fines diagnósticos, material genético vírico frágil procedente de tejidos dañados o en estado de putrefacción. Un año antes, en 1994, pusimos nuestra técnica novedosa al servicio de un patólogo de mamíferos marinos del AFIP, que investigaba una mortandad de delfines atribuida a la marea roja. Aunque las muestras disponibles de tejido de los delfines estaban muy deterioradas, extrajimos ARN en cuantía suficiente para identificar un virus inédito, similar al que origina el moquillo del perro, y que resultó ser el verdadero culpable de la muerte de los delfines. No tardamos en plantearnos la posibilidad de aplicar nuestro método a la resolución de otros misterios médicos irresueltos.

El AFIP, sucesor del Museo Médico del Ejército fundado en 1862, ha crecido en paralelo a la especialidad médica de patología. Su colección actual consta de tres millones de muestras. Cuando comprobamos que incluía muestras de autopsias de víctimas de la epidemia de gripe de 1918, decidimos ir tras el virus de la pandemia. En nuestro estudio inicial examinamos 78 muestras de tejido de víctimas fallecidas en la ola del otoño de 1918; nos centramos en las que denunciaban alteraciones pulmonares graves, característico de personas que fallecieron al poco de contraer la enfermedad. Aunque el virus de la gripe desaparece de los pulmones apenas unos días después de la infección, tales víctimas ofrecían una posibilidad única de encontrar virus.

La práctica habitual en aquellos tiempos consistía en conservar las muestras de la autopsia en formaldehído y, después, incluirlas en parafina. Con las técnicas disponibles no era fácil extraer fragmentos genéticos mínimos del virus a partir de tejidos "fijados" hace 80 años. Tras un año duro de resultados negativos, hallamos la primera muestra positiva del virus de la gripe en 1996, en el pulmón de un soldado muerto en septiembre de 1918 en Fuerte Jackson, Carolina del Sur. Determinamos la secuencia de nucleótidos en pequeños fragmentos de cinco genes del virus procedentes de esta muestra.

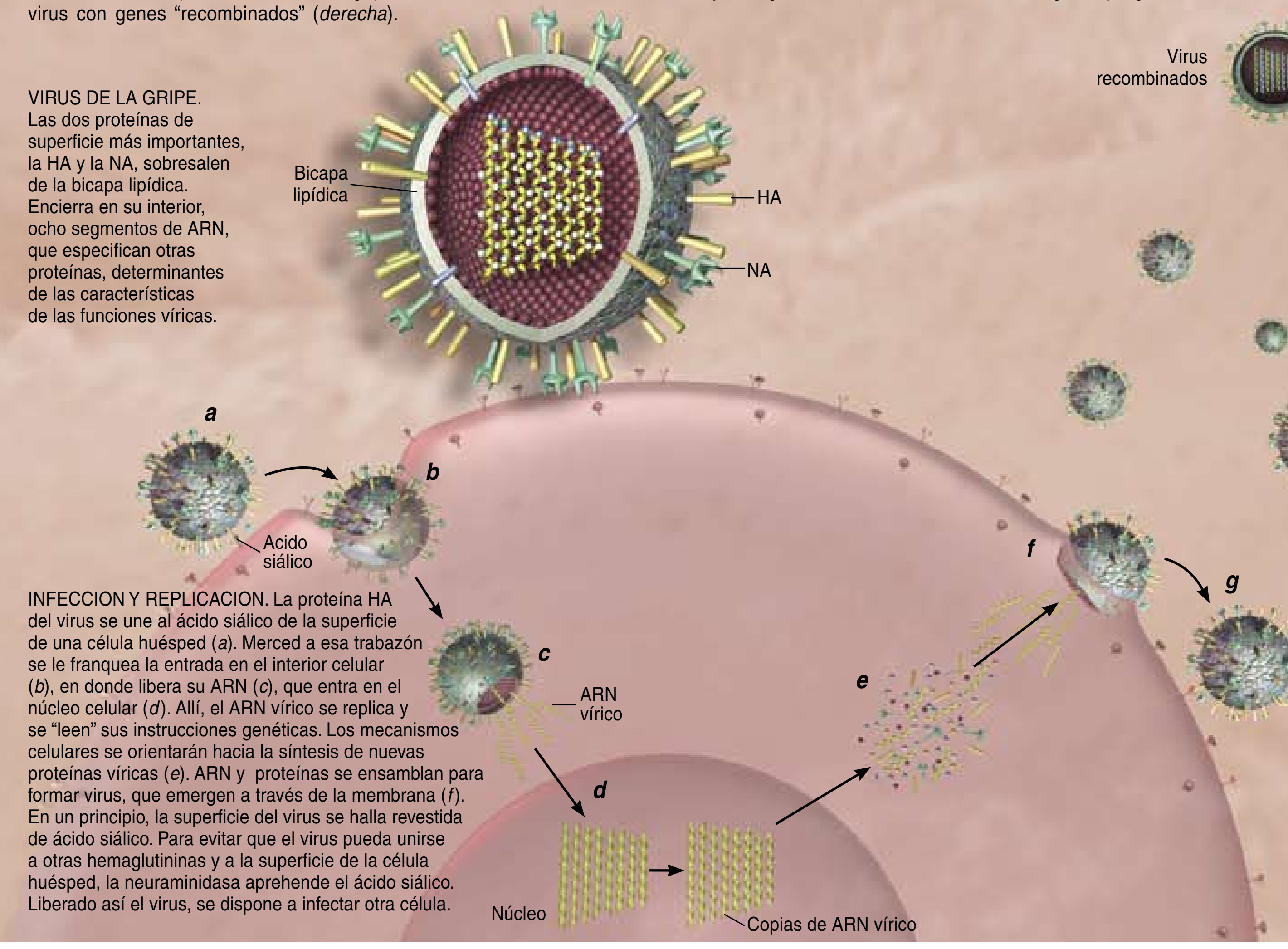
Con el fin de comprobar si la secuencia pertenecía al virus letal de 1918, buscamos más casos positivos. Identificamos otro en 1997; se trataba de un soldado fallecido en septiembre de 1918, en el campamento militar de Upton, Nueva York. Esta segunda muestra nos permitía confirmar las secuencias génicas que teníamos, pero la pequeña cantidad de tejido disponible de estas autopsias nos hacía temer que nunca lograríamos generar la secuencia vírica completa.

La solución del problema nos vino en 1997, de forma inesperada. Johan Hultin, un patólogo retirado de 73 años de edad, había leído nuestros resultados iniciales. Se ofreció a volver a Brevig Mission e intentar nuevas exhumaciones de víctimas de la gripe de 1918 enterradas en permafrost. Cuarenta y seis años después de su primer intento, con el permiso de las autoridades de Brevig Mission, obtuvo biopsias de pulmones congelados procedentes de cuatro víctimas de la gripe. En una de estas muestras, perteneciente a una mujer de edad desconocida, encontramos ARN del virus de la gripe, que proporcionó la clave para secuenciar el genoma completo del virus de 1918.

Más recientemente, nuestro grupo, en colaboración con colegas británicos, ha estudiado muestras de tejido procedentes de autopsias de víctimas de la gripe de 1918 del Hospital Real de Londres. Tras analizar genes del virus de la gripe de dos de estos casos, se comprobó que eran prácticamente idénticos a las muestras norteamericanas, lo que confirmaba la rápida expansión mundial de un virus uniforme. Pero, ¿qué puede decirnos la secuencia del mismo sobre

REPLICACION Y EVOLUCION DEL VIRUS DE LA GRIPE

En comparación con otros muchos virus, el de la gripe sobresale por su breve tamaño y sencillez: una bola lipídica hueca, ribeteada de unas pocas proteínas y con ocho segmentos génicos (*abajo*). Pero no necesita más para cumplir su misión: inducir a las células huésped a producir nuevas partículas. En la superficie del virus de la gripe hay una proteína que reviste una importancia determinante. La hemaglutinina (HA), de ella se trata, opera a modo de llave que franquea la entrada del virus en el interior celular. De la forma de la proteína depende qué huéspedes se infectarán. Otra proteína, la neuraminidasa (NA), segmenta los nuevos virus salidos de una célula infectada e influye en la eficiencia de la propagación. Bastan leves cambios en esta y en otras proteínas para que el virus infecte nuevos huéspedes y soslaye el ataque inmunitario. Las alteraciones pueden deberse a errores en el proceso de replicación de los genes víricos o bien a que dos virus de la gripe diferentes infecten la misma célula y sus genes se intercambien, dando lugar a progenies de virus con genes "recombinados" (*derecha*).



VIRUS DE LA GRIPE. Las dos proteínas de superficie más importantes, la HA y la NA, sobresalen de la bicapa lipídica. Encierra en su interior, ocho segmentos de ARN, que especifican otras proteínas, determinantes de las características de las funciones víricas.

INFECCION Y REPLICACION. La proteína HA del virus se une al ácido siálico de la superficie de una célula huésped (*a*). Merced a esa trabazón se le franquea la entrada en el interior celular (*b*), en donde libera su ARN (*c*), que entra en el núcleo celular (*d*). Allí, el ARN vírico se replica y se "leen" sus instrucciones genéticas. Los mecanismos celulares se orientarán hacia la síntesis de nuevas proteínas víricas (*e*). ARN y proteínas se ensamblan para formar virus, que emergen a través de la membrana (*f*). En un principio, la superficie del virus se halla revestida de ácido siálico. Para evitar que el virus pueda unirse a otras hemaglutininas y a la superficie de la célula huésped, la neuraminidasa aprehende el ácido siálico. Liberado así el virus, se dispone a infectar otra célula.

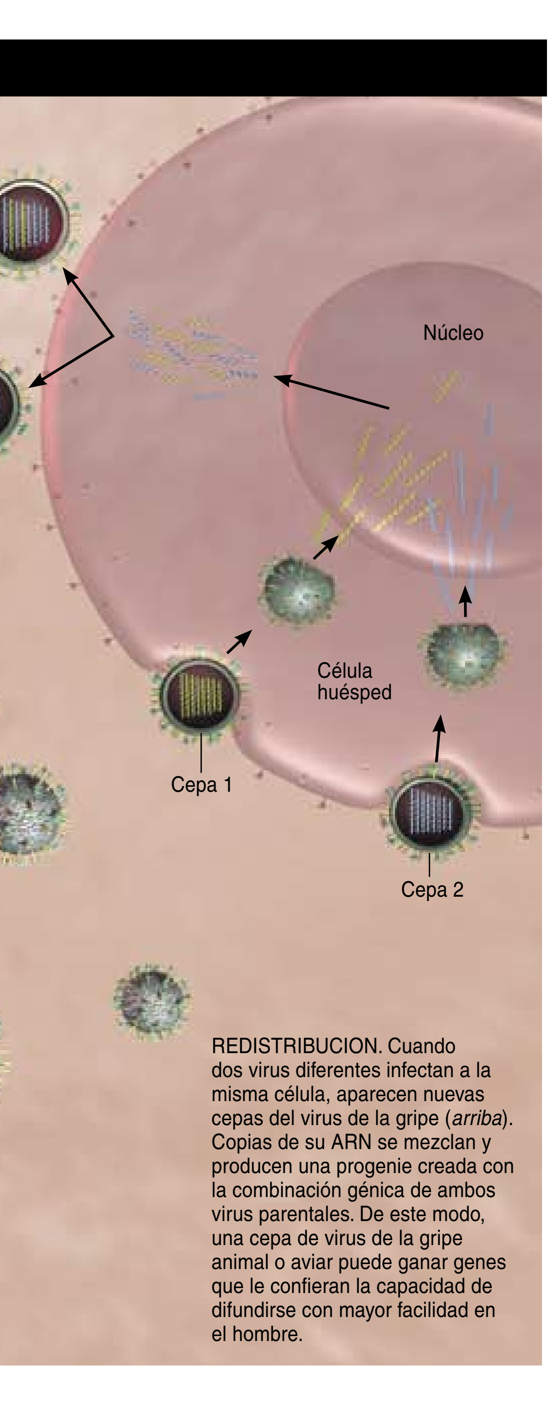
GEORGE RETSECK

la virulencia y el origen de la cepa de 1918? La respuesta a estas cuestiones requiere un breve repaso del comportamiento del virus de la gripe y su acción causal de la enfermedad en huéspedes distintos.

El rostro cambiante de la gripe

Cada una de las tres nuevas cepas de virus de la gripe que han originado pandemias en los últimos cien años pertenecen al tipo A. El virus de la gripe aparece bajo tres formas principales, A, B y C. Las dos últimas infectan sólo al hombre y nunca han causado pandemias. Los virus de tipo A, sin embargo, infectan a una amplia variedad de animales: aves, cerdos, caballos, hombres y otros mamíferos. Las aves acuáticas actúan como "reservorios" naturales de todos los subtipos conocidos del virus de tipo A, lo que significa que los virus infectan el aparato digestivo de las aves sin causarles síntomas. Con el tiempo, estas cepas de aves silvestres mutan o intercambian material genético con otras cepas de virus de la gripe; se originan así nuevos virus que pueden extenderse entre los mamíferos y aves domésticas.

El ciclo biológico y la estructura del genoma del virus A de la gripe le permiten desarrollarse e intercambiar genes con facilidad. El material genético del virus consiste en ocho segmentos de ARN incluidos en una cápside de lipoproteínas. Para reproducirse, el virus se une a una célula viva, a continuación entra en ella y comienza a dirigir la maquinaria celular, induciéndola a fabricar nuevas proteínas víricas y copias adicionales del ARN vírico. Estos fragmentos se



REDISTRIBUCION. Cuando dos virus diferentes infectan a la misma célula, aparecen nuevas cepas del virus de la gripe (*arriba*). Copias de su ARN se mezclan y producen una progenie creada con la combinación génica de ambos virus parentales. De este modo, una cepa de virus de la gripe animal o aviar puede ganar genes que le confieran la capacidad de difundirse con mayor facilidad en el hombre.

ensamblan para formar nuevos virus, que salen de la célula huésped e infectan a otras células. Ningún mecanismo de edición comprueba la corrección de las copias de ARN, su exactitud; de ahí que abunden los errores y aparezcan nuevas mutaciones. Es más, si dos cepas diferentes de virus gripal infectan una misma célula, sus segmentos de ARN pueden mezclarse libremente en su interior y producir progenies víricas que contienen una combinación de genes procedentes de ambos virus originales. Tamaño reparto de genes víricos constituye un importante mecanismo de generación de cepas novedosas.

Los distintos virus A de la gripe circulantes se identifican en función de dos proteínas de superficie: hemaglutinina (HA) y neuraminidasa (NA). La hemaglutinina tiene al menos quince variantes o subtipos conocidos; la neuraminidasa presenta nueve subtipos. La exposición a estas proteínas produce en el huésped diferentes anticuerpos; la cepa 1918 fue la primera en denominarse "H1N1", en función de los anticuerpos hallados en el torrente sanguíneo de los supervivientes de la pandemia. Descendientes menos letales del H1N1 fueron los virus de la gripe que predominaron hasta 1957: ese año apareció un virus H2N2 responsable de una pandemia. Desde 1968 ha prevalecido el subtipo H3N2, que provocó una pandemia en esa fecha.

Los subtipos de las proteínas HA y NA presentes en un virus de la gripe de tipo A dado son algo más que meros identificadores. Resultan imprescindibles para la reproducción del virus y son el primer objetivo del sistema inmunitario de un huésped infectado. La molécula HA comienza la infección fijándose a los receptores de superficie de algunas células del huésped. Suelen ser éstas, en los mamíferos, células de revestimiento del tracto respiratorio; en las aves, células de revestimiento del tracto intestinal. La proteína NA deja que las nuevas réplicas del virus abandonen la célula huésped y pasen a infectar a otras células.

Tras la primera exposición de un huésped a un subtipo HA, los anticuerpos bloquearán en el futuro la unión de los receptores; gracias a ello, se evitan reinfecciones de la misma cepa. Con regularidad periódica aparecen virus de la gripe con subtipos HA nuevos para el hombre, fruto de recombinaciones con la gran cantidad de virus de la gripe que infectan a las aves silvestres. Ahora bien, los virus HA provenientes de huéspedes aviares no acostumbran formar uniones con los receptores de superficie presentes en el tracto respiratorio del hombre. Ello significa que deberá modificarse la afinidad de fijación de la HA vírica para que el virus consiga replicarse y difundirse en el hombre. Las pruebas existentes sugerían, hasta hace poco, que un virus completo de gripe aviar no podía infectar directamente al hombre; pero en 1997, en Hong Kong, 18 personas se infectaron con un virus H5N1 de la gripe aviar y seis de ellas murieron.

Brotes de una versión aún más patógena de esta cepa H5N1 se extendieron entre las aves de corral en Asia en 2003 y 2004. Murieron más de 30 personas infectadas con este virus en Vietnam y Tailandia.

La virulencia de un virus de la gripe, una vez ha infectado a un huésped, se determina por una compleja serie de factores; entre ellos: rapidez con que el virus penetra en los tejidos, velocidad de replicación e intensidad de la respuesta inmunitaria del huésped ante el intruso. El comprender, pues, con exactitud qué hizo tan infecciosa y tan virulenta a la cepa del virus de la gripe pandémica de 1918 puede ayudarnos a entender qué convierte a una cepa causante de esta enfermedad en una amenaza.

El rostro de un asesino

Con el ARN del virus 1918 que habíamos recuperado, nos servimos de los propios genes víricos, a modo de patrón, para fabricar sus componentes; en particular, fragmentos del virus asesino. En nuestra búsqueda de las peculiaridades que confirieron su desorbitada virulencia a la cepa de 1918, nos apremiaba empezar por la proteína hemaglutinina.

Observamos que el fragmento de HA 1918 que se fija a la célula huésped venía a coincidir con el lugar de fijación de la HA de un virus de la gripe exclusivamente aviar. En dos de los virus 1918 aislados, ese sitio de unión del receptor diverge del aviar en un aminoácido. En los tres restantes, se encuentra alterado, además, un segundo aminoácido. Estas sutiles mutaciones quizá representen el cambio mínimo necesario que permite a un tipo HA aviar fijarse a receptores de mamíferos.

Aunque conseguir una nueva afinidad de unión constituye un requisito esencial para que el virus infecte a otro tipo de huésped, ello no basta para justificar la extraordinaria letalidad de la cepa de 1918. Para acotar rasgos directamente vinculados con la virulencia, volvimos a las secuencias génicas; consideramos, entre

MANIPULACION GENETICA DEL VIRUS DE LA GRIPE

El análisis de los genes del virus 1918 no aportó razones suficientes que justificaran la virulencia de la cepa pandémica. Ante esa limitación, nuestro grupo recurrió a la genética inversa, método que parte de las proteínas para desentrañar la función de los genes que las codifican.

En colaboración con investigadores de otras instituciones de la nación —facultad de medicina Monte Sinaí, Centros de Control y Prevención de las Enfermedades (CDC), departamento de agricultura, Universidad de Washington e Instituto Scripps de Investigación—, "construimos" virus de la gripe que contenían uno o más genes del virus 1918; nos guiaba un interés común: conocer el mecanismo de actuación de esos virus recombinantes en cultivos celulares animales y humanos.

Para fabricar tales virus, recurrimos a la genética inversa basada en plásmidos. Mediante esa técnica, se copia en ADN los genes del virus de la gripe, que habitualmente existen en su forma ARN. Cada copia del ADN del gen se inserta en un plásmido (un anillo sutil de ADN). Se pueden inyectar combinaciones diferentes de estos plásmidos en el interior de células; la maquinaria celular ejecutará luego las instrucciones que portan y fabricará virus de la gripe con la combinación de genes deseada.

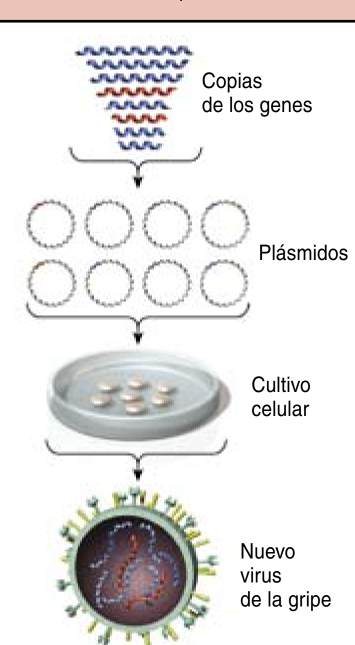
La genética inversa no sólo nos ha permitido estudiar el virus 1918, sino que ha posibilitado también la investigación del grado de amenaza que representa para el hombre el virus H5N1 de la gripe aviar. Desde enero de 2004, esta cepa, presente en aves de 10 países asiáticos, ha infectado a más de 40 personas, matando a una treintena de ellas. Uno de los fallecidos fue una madre que, según parece, se contagió de su hija y no directamente de un ave.

Este tipo de transmisión horizontal, de hombre a hombre, sugiere que en su caso el virus aviar se habría adaptado para difundirse mejor entre los humanos, bien por mutación, bien por adquisición de nuevos genes en un proceso de recombinación con cepas circulantes de virus de la gripe humana. Esta fatal evolución incrementaría la posibilidad de una pandemia humana. Con la esperanza de predecir y, por tanto, prevenir tal desastre, los investigadores del CDC y de la Universidad de Erasmus han acordado investigar combinaciones de H5N1 con cepas comunes de virus de la gripe humana para confirmar la posibilidad de que los virus recombinantes surjan de forma natural y determinar su virulencia en la población.

Los resultados de estos experimentos y el trabajo de nuestro grupo sobre el virus 1918 son cruciales para comprender cómo aparece una cepa pandémica del virus de la gripe y por qué los genes víricos causan la enfermedad. A propósito de las objeciones planteadas por algunos en torno a la seguridad en la experimentación con cepas letales del virus de la gripe, hemos de aclarar que todos los pasos de la investigación se realizan en laboratorios diseñados para trabajar con virus de la gripe muy agresivos.

A mayor abundamiento, la reconstrucción de proteínas del virus 1918 nos permitió comprobar que los fármacos disponibles —la amantadine o los nuevos inhibidores de la neuraminidasa como el oseltamivir (Tamiflu)— resultarían eficaces contra la cepa 1918 en el caso de una infección accidental. Los virus H5N1 son también sensibles a los inhibidores de la neuraminidasa.

Un grupo mixto de investigadores, norteamericanos y británicos, acaba de aplicar la genética inversa basada en plásmidos para crear una cepa seminal de una vacuna humana contra la H5N1. Hicieron una versión del virus H5N1 en la que se habían eliminado sus caracteres más dañinos. La vacuna H5N1 ha pasado ya a la fase de ensayo clínico.



LA GENETICA INVERSA basada en plásmidos permite crear virus de la gripe específicos. Se insertan copias de ADN de los genes de dos cepas diferentes de virus de la gripe *(azul* y *rojo)* en plásmidos. Esos anillos de ADN, portadores de genes, se inyectan en un cultivo celular. Las células fabrican virus de la gripe completos, con la combinación de genes deseada.

GEORGE RETSECK

ellos, dos mutaciones conocidas en otros virus de la gripe. Una mutación concierne al gen HA: para activarse en una célula, la proteína HA ha de partirse en dos fragmentos; la división corre a cargo de una enzima intestinal específica —una proteasa— suministrada por el huésped. Algunos virus de la gripe aviar, de los subtipos H5 y H7, adquieren una mutación génica que añade uno o más aminoácidos básicos al lugar de segmentación; ello permite que proteasas del huésped activen la HA. En las aves de corral, la infección por uno de estos virus afecta a un gran número de órganos, incluido al sistema nervioso central, con tasas de mortalidad muy elevadas. Esta mutación se ha observado en los virus H5N1, activos ahora en Asia. No la hemos encontrado en el virus 1918.

La otra mutación con efectos importantes sobre la virulencia concierne al gen NA de dos cepas del virus de la gripe que infecta a los ratones. De nuevo, la mutación de un aminoácido permite que el virus se replique en muchos tejidos diferentes del organismo y estas cepas gripales son letales en ratones de laboratorio. Tampoco hemos visto esta mutación del NA que apareció en el virus 1918.

Puesto que el análisis de los genes del virus 1918 no revelaba ninguna característica que diera razón de letal virulencia, decidimos abrir otra línea de investigación. Comenzamos a colaborar con otras instituciones para reproducir fragmentos del virus y observar sus efectos en tejidos vivos.

Recurrimos a una técnica reciente, la genética inversa basada en plásmidos. La aplicación de ese método nos facultaba para copiar segmentos del virus 1918 y combinarlos con genes de una cepa existente de virus gripal, con lo se obtenía un virus híbrido. A modo de ejemplo, podemos combinar una cepa del virus de la gripe de los ratones con genes del virus 1918. Luego, si infectamos a un animal o a un cultivo de tejido humano con este virus "sintético" podremos

comprobar en qué componentes de la cepa pandémica se escondía la clave de su patogenicidad.

La capacidad del virus 1918 para producir una grave alteración del tracto respiratorio, superior o inferior, induce a pensar que se replicaba con suma celeridad y pasaba presto de célula a célula. Se sabe que la proteína vírica NS1 impide la síntesis del interferón (IFN) tipo I, un sistema de "alerta precoz" que las células utilizan para desplegar la respuesta inmunitaria contra la infección vírica. Cuando analizamos virus recombinantes en un cultivo de células de tejido pulmonar humano, descubrimos que el virus portador del gen NS1 1918 bloqueaba con eficacia realzada el sistema IFN tipo I del huésped.

Hasta la fecha, hemos obtenido recombinaciones de virus de la gripe que contienen entre dos y cinco genes del virus 1918. Hallamos que todos los virus recombinantes en posesión de los genes HA y NA del virus 1918 eran letales en el ratón y producían graves daños en el pulmón, semejantes a los vistos en las víctimas de la pandemia. Cuando examinamos estos tejidos pulmonares, aparecieron huellas de la activación génica implicada en las respuestas inflamatorias normales. Resultó además evidente una activación superior a la normal de los genes asociados a las células T y los macrófagos ("peones de brega" del sistema inmunitario), así como de los genes relacionados con la alteración tisular, el daño oxidativo y la apoptosis o suicidio celular.

En fecha reciente, Yoshihiro Kawaoka, de la Universidad de Wisconsin en Madison, informó de pesquisas similares con genes del virus de la gripe de 1918 en ratones. Llegó a resultados parecidos. Sin embargo, cuando analizó por separado los genes HA y NA, descubrió que sólo el HA 1918 produce la respuesta inmunitaria masiva. Por motivos aún desconocidos, esta proteína podría desempeñar un papel decisivo en la virulencia de la cepa de 1918.

Gracias a esos experimentos, se nos ha franqueado la entrada en el mundo de las condiciones excepcionales de la pandemia de 1918. Las técnicas habrán de servir para averiguar qué cambios podrían operarse en la actual cepa H5N1 del mortífero virus de la gripe aviar asiática y convertirla en un arma pandémica para los humanos. No menos interés reviste saber cómo surgen tales cepas virulentas; en esa línea, nuestro grupo ha analizado los genes del virus de 1918 para averiguar las claves de su origen.

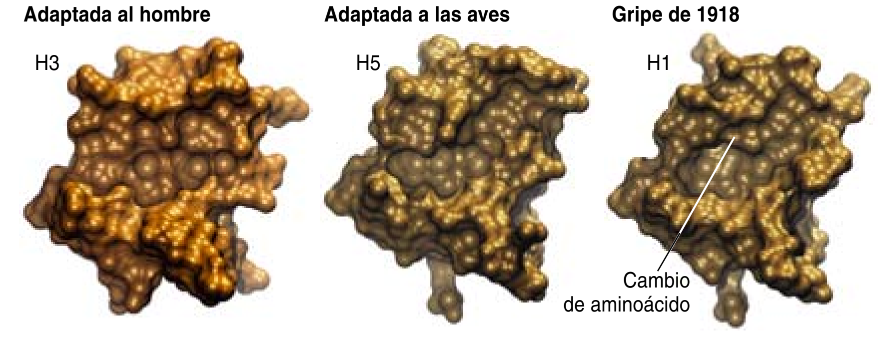
En busca de los orígenes

Para abordar las relaciones entre los virus de la gripe, hemos de acudir a la filogenética. La construcción de hipotéticos dendrogramas de parentesco se funda en un doble criterio: la secuencia de genes víricos y la tasa de mutación génica. Puesto que el genoma de un virus gripal se compone de ocho segmentos de ARN, que en la recombinación cambian de lugar, los estudios evolutivos deben realizarse de forma independiente para cada segmento.

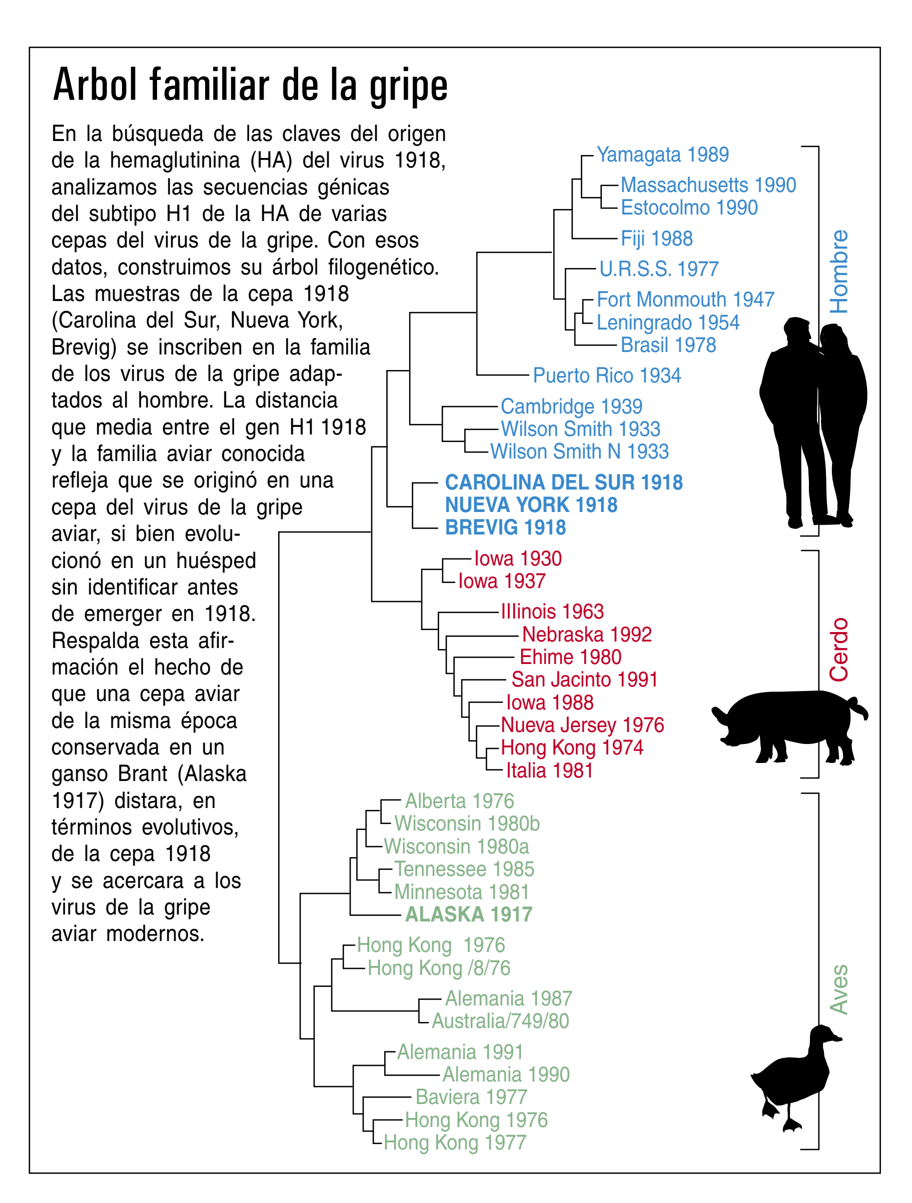
Hemos terminado el análisis de cinco de los ocho segmentos de ARN del virus 1918. Por ahora, las comparaciones entre los genes del virus 1918 y los de un gran números de virus de la gripe humana, porcina y aviar incluyen siempre a aquél entre las familias humana y porcina, fuera del grupo aviar. Sin embargo, los genes del virus 1918 comparten ciertos rasgos con el virus aviar; cabe, pues, sospechar que el virus surgiera en un reservorio aviar antes de 1918. En ese año, el virus se había adaptado a los mamíferos y actuó como un virus humano pandémico. Pero, ¿dónde?

Cuando analizamos el gen de la hemaglutinina 1918, encontramos que su secuencia divergía de las secuencias génicas aviares más que los subtipos H2 1957 y H3 1968. Por tanto, o bien el gen HA 1918 había pasado un tiempo en un huésped intermedio en el que acumuló numerosos cambios respecto a la secuencia aviar original, o bien el gen procedía directamente de un virus aviar muy diferente de las secuencias H1 aviares conocidas.

Para resolver si los genes H1 cambiaron de forma sustantiva en el transcurso de los ochenta años subsiguientes a la pandemia de 1918, entramos en contacto con expertos del Museo de Historia Natural (Institución Smithsoniana) y de la Universidad de Ohio. Tras examinar un extenso número de aves de ese período, nuestro grupo aisló una cepa del virus subtipo H1 de un ganso Brant cazado en 1917 y conservado en etanol en las vitrinas de aves del museo. Su estudio reveló que la secuencia H1 aviar 1917 guardaba una estrecha relación con cepas H1 norteamericanas aviares modernas, lo que sugería que las secuencias aviares habían cambiado poco en los últimos ocho decenios. Un trabajo pormenorizado de secuenciación de otras cepas H1 de aves silvestres quizá nos ayudaría a identificar una cepa que revelara mayor cercanía a la HA 1918, pero entra dentro de lo posible que no exista ninguna cepa H1 aviar semejante a



3. LA HEMAGLUTININA (HA) de la cepa de la gripe 1918 se reconstruyó a partir de su secuencia genética. Se abordó entonces el examen de aquella parte de la misma que se unía al ácido siálico de la célula huésped, paso necesario para la penetración del virus. Los lugares de unión de la HA tienen configuraciones muy diferentes, lo que dificulta la infección cruzada de especies. Por ejemplo, la HA tipo H3 adaptada al hombre posee una amplia cavidad en mitad de su lugar de unión (*izquierda*); estrecha es, por contra, la cavidad del H5 aviar (*centro*). La HA tipo H1 1918 (*derecha*) se acerca más a la forma aviar, con unas mínimas diferencias en la secuencia de aminoácidos, sus bloques constructores. Una de estas alteraciones (*arriba a la derecha*) dilata ligeramente la cavidad central, lo suficiente para dejar que un virus de la gripe con este HA tipo aviar infectara a centenares de millones de personas entre 1918 y 1919.



Arbol familiar de la gripe

En la búsqueda de las claves del origen de la hemaglutinina (HA) del virus 1918, analizamos las secuencias génicas del subtipo H1 de la HA de varias cepas del virus de la gripe. Con esos datos, construimos su árbol filogenético. Las muestras de la cepa 1918 (Carolina del Sur, Nueva York, Brevig) se inscriben en la familia de los virus de la gripe adaptados al hombre. La distancia que media entre el gen H1 1918 y la familia aviar conocida refleja que se originó en una cepa del virus de la gripe aviar, si bien evolucionó en un huésped sin identificar antes de emerger en 1918. Respalda esta afirmación el hecho de que una cepa aviar de la misma época conservada en un ganso Brant (Alaska 1917) distara, en términos evolutivos, de la cepa 1918 y se acercara a los virus de la gripe aviar modernos.

JOHNNY JOHNSON

la cepa 1918; por una razón poderosa: la HA no se recombinó directamente a partir de una cepa aviar.

En este caso, debió haber algún huésped intermedio. Quizá fuera el cerdo, animal sensible a los virus humanos y a los aviares. Hubo brotes simultáneos de gripe en humanos y en cerdos durante la pandemia de 1918, pero pensamos que la transmisión se produjo del hombre al cerdo. La historia nos ofrece múltiples ejemplos de cepas de virus de la gripe A humana que han infectado cerdos desde 1918; por contra, sólo de forma esporádica se han aislado en humanos cepas de gripe porcina. No obstante, con el fin de estudiar la posibilidad de que el HA 1918 hubiera empezado como una forma aviar que poco a poco se hubiera adaptado a huéspedes mamíferos a través del cerdo, recurrimos a un prototipo moderno de desarrollo de virus aviares en cerdos. Se trataba de un linaje del virus de la gripe H1N1 aviar, establecido en cerdos europeos desde hace 25 años. ¿Qué descubrimos? Ni siquiera 20 años de evolución en cerdos habían producido, en las secuencias aviares, la cantidad de cambios que presentaba la cepa pandémica 1918.

Cuando acometimos este tipo de análisis en otros cuatro genes del virus 1918 llegamos a idéntica conclusión: el virus que produjo la pandemia de 1918 pudo muy bien haber sido una cepa aviar; ésta, aislada en el curso de la evolución, a partir del reservorio del gen de la gripe, característico de aves acuáticas silvestres durante un tiempo. Ese virus, a la manera del coronavirus del síndrome respiratorio agudo severo (SARS), pasó a los humanos desde un huésped animal todavía por identificar.

Investigación abierta

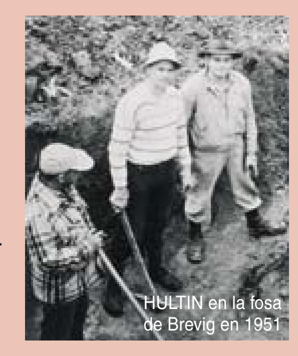
Nuestros análisis de cinco segmentos ARN del virus 1918 han arrojado alguna luz sobre su origen y sugieren que el virus pandémico no procedía del cerdo, sino que era el antecesor común de los linajes H1N1 humano y porcino posteriores. Hasta la fecha, el análisis de los genes víricos no ha dado las claves definitivas de la excepcional letalidad de la cepa del virus 1918. Ello no obstante, los experimentos desarrollados con virus creados *in vitro*, que portaban incorporados genes 1918, indican que algunas proteínas víricas del mismo provocaban su rápida multiplicación y producían una respuesta inmunitaria devastadora en el huésped.

En futuros trabajos esperamos emplazar la cepa del virus pandémico 1918 en el contexto de los virus de la gripe que le precedieron y sucedieron. El precursor directo del virus pandémico, la cepa vírica primaria (oleada de primavera), no tenía la virulencia de la oleada de otoño y parece que se diseminó con mayor lentitud.

Estamos ahora buscando muestras de ARN gripal en víctimas de la oleada de primavera para identificar cualquier diferencia genética entre ambas cepas que contribuya a dilucidar el porqué de la malignidad superior de la oleada de otoño. En la misma senda, el hallazgo de muestras de ARN de la gripe humana anteriores a 1918 ayudaría a esclarecer qué segmentos génicos del virus 1918 eran novedosos para el hombre. La inusual, por elevada, mortalidad entre los jóvenes durante la pandemia de 1918 podría justificarse si el virus compartiera rasgos con cepas que ya habían circulado, frente a las cuales la gente mayor se hallara, pues, más o menos inmunizada. Si se encontraran muestras de H1N1 de los años veinte y posteriores, podríamos comprender mejor la evolución del virus 1918 hacia formas de menor virulencia.

Importa no olvidar que nos hallamos lejos de conocer los mecanismos mediante los cuales se originan las cepas de pandemias gripales. Las cepas de las pandemias de 1957 y 1968 presentaban proteínas HA semejantes a las aviares; pudieron, pues, ori-

La perseverancia merece la pena


HULTIN en la fosa de Brevig en 1951

Johan Hultin, estudiante de medicina, se propuso pasar el verano de 1940 en Alaska. En la capital, Fairbanks, dio con unos misioneros luteranos que le hablaron de la pandemia de gripe de 1918 sufrida por varios pueblos inuit. Uno de ellos, un pequeño asentamiento en la península de Seward llamado Teller Mission, fue borrado del mapa en noviembre de 1918. Los misioneros de entonces tuvieron que pedir ayuda al ejército para enterrar los cuerpos de las 72 víctimas en una fosa común, que señalaron con dos cruces.

Cautivado por el relato, Hultin (*a la derecha, situado en el centro* y *abajo*) marchó a la Universidad de Iowa para comenzar sus estudios de doctorado en microbiología. Allí continuó pensando en la pandemia de 1918 y se preguntó si el mortífero virus desencadenante podría recuperarse de los cuerpos conservados en el permafrost de Alaska para su estudio. En el verano de 1951, Hulting convenció a otros dos claustrales de la Universidad de Iowa, un virólogo y un patólogo, para que visitaran el pueblo, ahora llamado Brevig Mission. Con permiso de los ancianos de la tribu, excavaron la fosa y sacaron muestras de tejido pulmonar de varias víctimas.

De vuelta a Iowa, el equipo intentó con ahínco el cultivo de virus a partir de las muestras, sin éxito. Visto desde hoy, quizá fuera porque no existían entonces los medios necesarios para trabajar con patógenos peligrosos.

Hultin, decepcionado, dejó la tesis de doctorado para especializarse en patología. En 1997, ya retirado en San Francisco, llegó a sus manos nuestro primer artículo sobre los genes 1918, obtenidos de muestras de autopsias. La lectura de lo allí descrito le hizo recuperar la esperanza de encontrar el virus 1918 completo. Me escribió, impaciente por intentar obtener nuevas muestras de pulmón de Brevig Mission para que nosotros trabajáramos con ellas. Se ofreció para una visita inmediata a Alaska. Acepté acompañarle.

Hultin localizó también a sus compañeros de la expedición de 1951 y les preguntó si habían guardado alguna de las muestras originales de Brevig. Pensábamos que estas muestras de tejido obtenidas 33 años después de la pandemia y posteriormente conservadas estarían en mejores condiciones que las muestras obtenidas después. Uno de los colegas de Hultin había guardado el material en un almacén durante años, pero finalmente pensó que no tenía ninguna utilidad y terminó por desecharlo. Dispuso de las últimas muestras hasta un año antes, en 1996.


HULTIN en la fosa de Brevig en 1997

En 1997 las autoridades de Brevig Mission concedieron de nuevo permiso a Hultin para excavar la fosa de 1918. Esta vez encontró el cuerpo de una mujer joven, que había padecido obesidad. Supo de inmediato que sus muestras de tejido contendrían el virus de 1918; junto a las bajas temperaturas, la gruesa capa de grasa de la mujer había conservado casi inalterados sus pulmones. No se equivocaba: las muestras nos proporcionaron el genoma completo del virus de la pandemia de 1918.

ginarse a partir de recombinaciones directas entre cepas víricas humanas y aviares. Pero se ignoran las circunstancias reales en las que se producen estas recombinaciones. En definitiva, nadie sabe cuánto tiempo necesita una cepa nueva para desencadenar una pandemia en el hombre.

La cepa de la pandemia de 1918 reviste incluso mayor complejidad. Sus secuencias génicas no se corresponden ni con una recombinación directa a partir de una cepa aviar, ni con una adaptación de una cepa aviar en el cerdo. Si se comprobara que el virus 1918 había obtenido nuevos genes a través de un mecanismo diferente del que emplearon las cepas de pandemias posteriores, ello acarrearía consecuencias de la mayor importancia para la salud pública. La excepcional virulencia de la cepa de 1918 podría tener otro origen. La secuenciación de muchos más virus de gripe aviar y la búsqueda de huéspedes alternativos diferentes del cerdo (aves de corral, aves silvestres o caballos, entre otros) podría arrojar más luz sobre el origen de la pandemia de 1918. Hasta que comprendamos mejor cómo nacieron estas cepas, las tareas de detección y prevención vigilan el comienzo de la próxima pandemia.

Los autores

Jeffery K. Taubenberger, Ann H. Reid y **Thomas G. Fanning** se hallan adscritos al Instituto de Patología de las Fuerzas Armadas en Rockville. En 1993, Taubenberger, patólogo molecular, participó en la fundación de un laboratorio dedicado al diagnóstico molecular de las enfermedades. Los trabajos de Reid, bióloga de formación, permitieron al grupo desarrollar las técnicas de extracción de ADN y ARN de tejidos dañados o en putrefacción; con la aplicación de las mismas se recuperaron fragmentos de los genes del virus de la gripe 1918. Fanning, experto en la evolución de los genomas, se ocupó de desentrañar las relaciones de estos genes con otros virus animales y humanos de la gripe.

Bibliografía complementaria

AMERICA'S FORGOTTEN PANDEMIC: THE INFLUENZA OF 1918. Segunda edición. Alfred W. Crosby. Cambridge University Press; 2003.

THE ORIGIN OF THE 1918 PANDEMIC INFLUENZA VIRUS: A CONTINUING ENIGMA. Ann H. Reid y Jeffery K. Taubenberger en *Journal of General Virology*, vol. 84, parte 9, páginas 2285-2292; septiembre 2003.

GLOBAL HOST IMMUNE RESPONSE: PATHOGENESIS AND TRANSCRIPTIONAL PROFILING OF TYPE A INFLUENZA VIRUSES EXPRESSING THE HEMAGGLUTININ AND NEURAMINIDASE GENES FROM THE 1918 PANDEMIC VIRUS. J. C. Kash, C. F. Basler, A. García-Sastre, V. Cartera, R. Billharz, D. E. Swayne, R. M. Przygodzki, J. K. Taubenberger, J. G. Katze y T. M. Tumpey en *Journal of Virology*, vol. 78, n.º 17, páginas 9499-9511; septiembre 2004.



Criptografía cuántica comercial

La criptografía cuántica no pertenece a la mera teoría. Pasó del papel a los laboratorios y, ahora, se materializa en productos tangibles, puestos a la venta

Gary Stix

Charles Bennett no tiene mucha experiencia en el laboratorio. De él se cuenta una de esas típicas anécdotas de físicos distraídos, de teóricos que, ausentes del mundo tangible, causan pequeños desastres; quemó, dicen, una tetera hasta cambiarle el color. Y sin embargo, a él y a sus colegas John A. Smolin y Gilles Brassard se les debe un experimento fundamental, que demostró en 1989 la existencia de una nueva criptografía basada en los principios de la mecánica cuántica.

En aquel experimento los fotones recorrieron un canal de 30 centímetros dentro de una cavidad impermeable a la luz a la que llaman "el ataúd de la tía Marta". La dirección en que oscilaban los fotones, su polarización, representaba los 0 o los 1 de una serie de bits cuánticos, o qubits. Los qubits contenían una clave criptográfica que valía para cifrar o descifrar un mensaje. Salvábase de intromisiones la clave con el principio de incertidumbre de Heisenberg, uno de los fundamentos de la física cuántica: la medida de una propiedad de un estado cuántico perturbará otra. En un sistema criptográfico cuántico, cualquier intruso que quiera fisgonear en un haz de fotones los alterará. Esa perturbación no les pasará inadvertida ni al remitente ni al receptor. Se garantiza así, al menos en principio, la perfecta seguridad de las claves criptográficas.

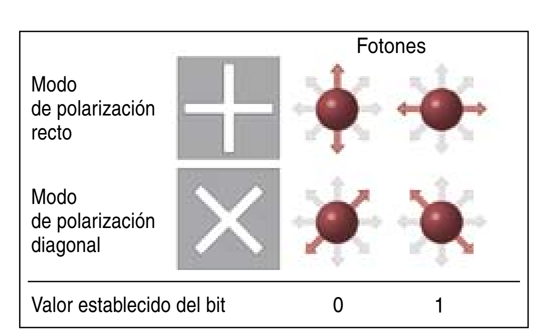
Hoy en día, la criptografía cuántica ha recorrido un largo camino desde aquella precaria exhibición. Ya hay dos pequeñas empresas que venden sistemas criptográficos cuánticos; otros productos semejantes vienen de camino. Con este nuevo método de encriptación, la ciencia de la información cuántica, que combina la mecánica cuántica y la teoría de la información, llega al mercado. El dispositivo supremo que podría darnos sería una computadora cuántica tan potente, que no hubiese otra protección contra su prodigiosa capacidad de descifrar mensajes que la criptografía cuántica.

La criptografía segura requiere que las claves con que se cifran y descifran los mensajes no puedan ser descubiertas por terceros. La criptografía de clave pública es una forma de proveer claves secretas de manera que la encriptación efectuada por una de las partes sólo pueda ser desencriptada por la otra y por nadie más; y ello, pese a que parte de la información pertinente sea de dominio público. La seguridad del procedimiento depende de la dificultad inherente a ciertos problemas matemáticos; en especial,

JEAN-FRANCOIS PODEVIN

CLAVES QUE LA MECANICA CUANTICA MANTIENE SECRETAS

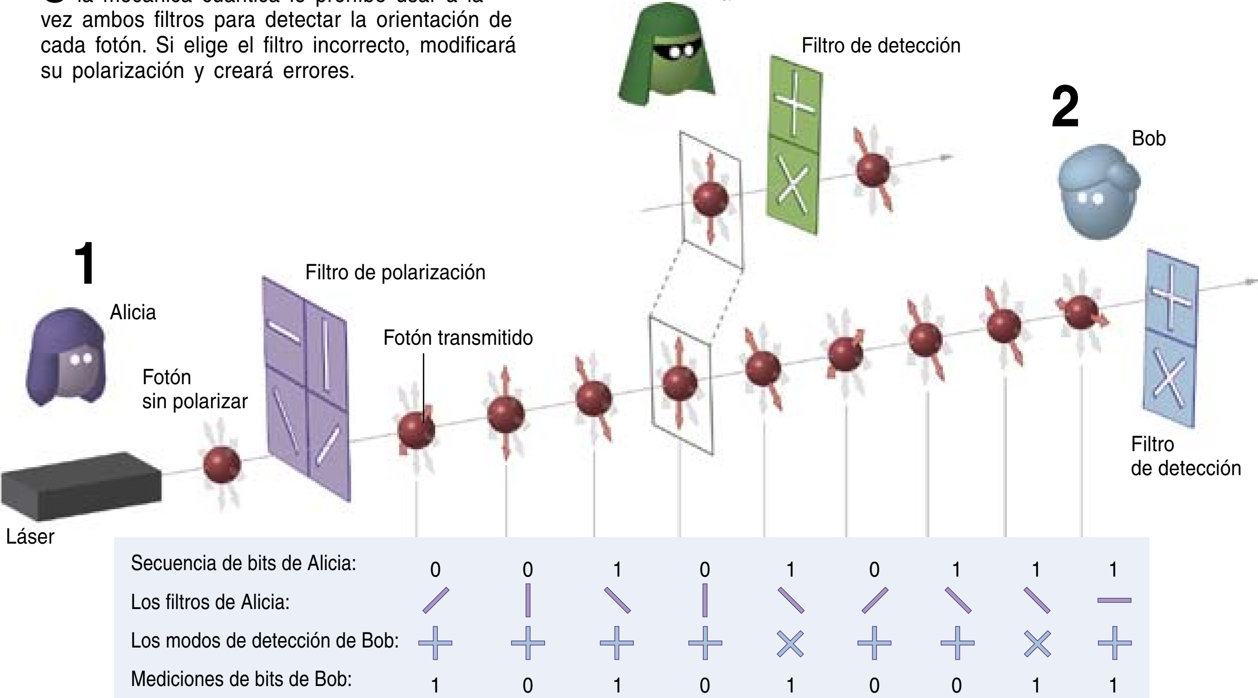
Alicia y Bob intentan mantener en secreto una clave de criptografía cuántica. Para ello, la transmiten en forma de fotones polarizados, procedimiento ideado por Charles Bennett, de IBM, y Gilles Brassard, de la Universidad de Montreal, durante los años ochenta y ahora materializado en algunos incipientes productos comerciales.



1 Para crear una clave, Alicia envía un fotón a través de la rendija 0 o de la 1 de unos filtros polarizantes rectos o diagonales; mientras, anota las distintas orientaciones.

2 Para cada bit que llega, Bob elige aleatoriamente qué filtro utiliza para la detección y anota tanto la polarización como el valor del bit.

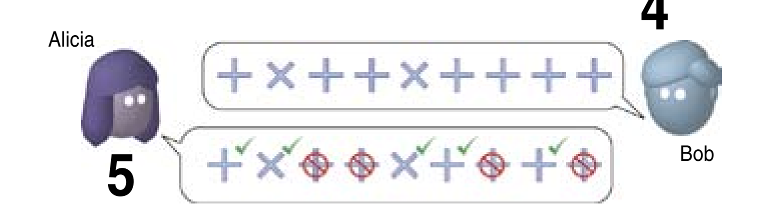
3 Eva quiere espiar el tren de fotones, pero la mecánica cuántica le prohíbe usar a la vez ambos filtros para detectar la orientación de cada fotón. Si elige el filtro incorrecto, modificará su polarización y creará errores.



Secuencia de bits de Alicia:	0	0	1	0	1	0	1	1	1
Los filtros de Alicia:	/	|	\	|	\	/	\	\	—
Los modos de detección de Bob:	+	+	+	+	×	+	+	×	+
Mediciones de bits de Bob:	1	0	1	0	1	0	0	1	1
Secuencia de bits conservados (la clave):	—	0	—	0	1	—	—	1	1

4 Una vez que todos los fotones han llegado a Bob, éste le dice a Alicia, por un canal público, quizá por teléfono o con un correo electrónico, la secuencia de modos de medición que utilizó para los fotones entrantes, pero no el valor del bit de los fotones.

5 Alicia le dice a Bob, durante la misma conversación, en qué casos eligió correctamente. Los correspondientes bits formarán la clave que Alicia y Bob utilizarán para cifrar los mensajes.



TOMMY MOORMAN; ADAPTADO DE *THE CODE BOOK: THE SCIENCE OF SECRECY FROM ANCIENT EGYPT TO QUANTUM CRYPTOGRAPHY*, POR SIMON SINGH (1999)

el de factorizar un número. Es fácil calcular el producto de dos números grandes, pero dificilísimo volverlo a factorizar en números primos. En esa asimetría se basa el algoritmo de cifrado RSA, muy usado en la criptografía de clave pública. El mensaje confidencial que se transfiere entre el remitente y el receptor, previamente convertido por un procedimiento estándar en un número, se encripta mediante una operación matemática en la que intervienen un número grande, digamos que 408508091 (en la práctica sería mucho mayor), y otro número relacionado con los factores primos —en este caso 18.313 y 22.307— del primero.

Quebrar un cifrado de clave pública resulta tan difícil, que el secreto de las claves se puede mantener durante una docena de años, como poco. Pero el advenimiento de la era de la información cuántica, y en particular de computadores cuánticos capaces de realizar con rapidez factorizaciones monstruosas, supondría seguramente el declive final del RSA y de otros métodos criptográficos.

Al contrario que la criptografía de clave pública, la criptografía cuántica seguiría siendo segura, aunque se dispusiese de ordenadores cuánticos. Una forma de enviar una clave criptográfica cuántica entre el remitente y el receptor consiste en que un láser transmita fotones, cada uno polarizado de una de dos maneras. En la primera, la polarización es vertical u horizontal (lo denominaremos “modo recto”); en la segunda, se orienta 45 grados hacia la izquierda o la derecha de la vertical (“modo diagonal”). En cualquiera de los modos, las polarizaciones opuestas de los fotones representan un 0 o un 1 digitales.

El remitente, a quien los criptógrafos acostumbran llamar Alicia, envía una cadena de bits; para cada fotón, que codificará uno de esos bits, elegirá aleatoriamente si lo envía en el modo recto o en el diagonal. El receptor, al que se llama Bob, decide al azar qué les medirá a los bits entrantes, si el modo recto o el diagonal. El principio de incertidumbre de Heisenberg dicta que podrá medir a los bits nada más que un modo. Bob sólo obtendrá con toda certeza el valor correcto cuando le mida a un bit el mismo modo en que lo envió Alicia.

QUIEN VENDE CLAVES “ABSOLUTAMENTE SEGURAS”

EMPRESA	TECNICA
id Quantique Ginebra	Envía por fibra óptica claves criptográficas cuánticas a distancias de decenas de kilómetros
MagiQ Technologies Nueva York	Envía por fibra óptica claves criptográficas cuánticas a cien kilómetros de distancia, como máximo; incluye componentes y programas para la integración en redes ya existentes
NEC Tokio	Venderá un producto de fibra óptica muy pronto; en 2004 transfirió en un ensayo claves a la mayor distancia conseguida por ahora, 150 kilómetros
QuinetiQ Farnborough	Ofrece por contrato sistemas que transfieren claves a través del aire a distancias de hasta 10 kilómetros; ha proporcionado uno a BBN Technologies, de Cambridge, Massachusetts

Después de la transmisión, Bob se comunica con Alicia, intercambio que no tiene ya por qué ser secreto, para decirle cuál de los dos modos le midió a cada fotón. Sin embargo, no revela el valor, 0 o 1, que obtuvo en cada caso. Alicia le dice entonces a Bob cuáles se midieron en el modo que correspondía; ambos descartan los demás. Los modos medidos correctamente constituyen la clave que se introducirá en el algoritmo empleado para encriptar o descifrar el mensaje.

Si alguien —llamémosla Eva— intenta interceptar esta serie de fotones, no podrá medir ambos modos, gracias a Heisenberg. Si Eva mide en el modo incorrecto, aunque reenvíe los bits a Bob en el mismo modo en que los midió, introducirá errores. Alicia y Bob pueden detectar la presencia de la espía comparando bits seleccionados y comprobando si hay errores.

Desde 2003, dos compañías —id Quantique, de Ginebra, y MagiQ Technologies, de Nueva York— han presentado productos comerciales que envían una clave de criptografía cuántica a más de los 30 centímetros recorridos en el experimento de Bennett. Tras exhibir una distancia de transmisión de 150 kilómetros —la mayor conseguida—, se espera que NEC presente un producto en el mercado el año que viene. IBM, Fujitsu y Toshiba trabajan en lo mismo.

Los productos ya comercializados pueden enviar claves por un enlace de fibra óptica a decenas de kilómetros. Un sistema de MagiQ cuesta de 70.000 a 100.000 dólares. El número de clientes es aún pequeño; el sistema no se ha implantado en ninguna red a gran escala.

Ciertos organismos gubernamentales e instituciones financieras temen que un mensaje cifrado espiado hoy se guarde hasta el día en que un ordenador cuántico pueda descifrarlo. Entre los posibles clientes de los sistemas de criptografía cuántica se hallan también los abastecedores de servicios de telecomunicaciones que prevén ofrecer a sus clientes un servicio ultraseguro.

Están en marcha los primeros intentos de dotar con criptografía cuántica, no a conexiones punto a punto, sino a verdaderas redes. DARPA —la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados para la Defensa—, el organismo estadounidense que patrocinó los inicios de lo que luego se llamaría Internet, ha financiado una conexión en red de seis nodos pertenecientes a la Universidad de Harvard, la Universidad de Boston y BBN Technologies, empresa de Cambridge, Massachusetts, que también desempeñó un papel fundamental en aquellos orígenes de Internet. Las claves cifradas se envían por enlaces reservados, por Internet los mensajes cifrados con ellas. Es la primera red de criptografía cuántica que opera sin interrupción fuera de un laboratorio. Se ha creado sólo para demostrar la viabilidad del procedimiento; no transmite informaciones confidenciales. El pasado otoño, id Quantique, junto con Deckpoint, proveedor de servicios de Internet, exhibió una red que un grupo de servidores de Ginebra utilizó para almacenar sus

LA ENCRIPTACION que involucra estados cuánticos utiliza técnicas tan avanzadas que mucha parte del trabajo todavía se hace en laboratorios; así, éste de MagiQ Technologies.

datos a 10 kilómetros de distancia. Un enlace con encriptación cuántica repartía —se trata de una operación frecuente— nuevas claves.

La actual criptografía cuántica está destinada a aplicarse a redes de alcance geográfico limitado. En su mayor virtud —que al espiar un mensaje o clave encriptados cuánticamente se cambie sin remedio— está su peor defecto: los dispositivos que restauran en la red las señales debilitadas para que se las pueda transmitir hasta el repetidor siguiente no podrían ejecutar esa tarea con las señales que codificarían las claves cuánticas. Un amplificador óptico corrompería los bits cuánticos, los qubits.

Para que pueda haber una mayor distancia entre enlaces, se persigue que un medio diferente de la fibra óptica distribuya las claves cuánticas. Se ha subido a montañas —donde la altitud reduce al mínimo la turbulencia atmosférica— para probar la viabilidad de enviar los fotones a través del aire. Un experimento, realizado en el año 2002 en el Laboratorio Nacional de Los Alamos, estableció un enlace de 10 kilómetros.

Otro ensayo, ese mismo año, de QinetiQ, en Farnborough, y la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich, cubrió 23 kilómetros entre dos cumbres de los Alpes meridionales. Optimizando esta técnica —con mayores telescopios para la detección y mejores filtros y recubrimientos antirreflectantes—, se podría construir un sistema capaz de transmitir y recibir señales a más de 1000 kilómetros; bastaría para llegar a los satélites situados en una órbita terrestre baja. Una red de satélites de ese tipo ofrecería una cobertura mundial.

La Agencia Espacial Europea ha empezado a proyectar un experimento que conectaría un satélite a tierra. (En abril del año pasado, la Unión Europea puso en marcha también planes para desarrollar la encriptación cuántica en redes de comunicaciones; la ha movido a ello, en parte, el deseo de prevenir el espionaje de Echelon, sistema que intercepta mensajes electrónicos para los servicios de inteligencia de los Estados Unidos, Gran Bretaña y otras naciones.)

En última instancia, los criptógrafos desean algún tipo de repetidor cuántico, que vendría a ser una forma elemental de computador cuántico capaz de superar las limitaciones de la distancia. Funcionaría gracias a las que Albert Einstein llamó *spukhafte Fernwirkungen*, "fantasmagóricas acciones a distancia". Un equipo del Instituto de Física Experimental de Viena, dirigido por Anton Zeilinger, ha dado un primer paso hacia un repetidor así: en el número de *Nature* del 19 de agosto de 2004 informaron de que habían tendido bajo el Danubio, por un conducto del alcantarillado, un cable de fibra óptica con un fotón "entrelazado" en cada extremo. La medida del estado de polarización de uno de esos fotones establecía



inmediatamente en el otro un estado de polarización correlacionado con el primero —justo en eso consiste el entrelazamiento.

Pese a que el entrelazamiento cuántico le pareciese fantasmagórico a Einstein, les valió a Zeilinger y su equipo para que la conexión por fibra óptica entre los dos fotones entrelazados "teletransportase" la información contenida en un tercer fotón al otro lado del Danubio, a 600 metros de distancia. Se podría extender el montaje mediante repetidores múltiples, hasta que los qubits de una clave se transmitiesen a través de continentes o de océanos. Pero ese cambio de escala requeriría la creación de componentes muy peculiares, memorias cuánticas, por ejemplo, que almacenasen los qubits sin corromperlos antes de que se los reexpidiera al enlace siguiente. Falta mucho para siquiera acercarse a la fabricación de elementos de esa especie. [Acerca de un experimento un poco anterior, en que se comprobó que el entrelazamiento de fotones transmitidos por el aire se mantenía entre ambas orillas del Danubio, pero sin que se teletransportase un estado, véase "Experimento en el Danubio", de Gabriel Molina Terriza, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2004, págs. 40-41].

Quizá se realizaría mejor una memoria cuántica con átomos que con fotones. Un experimento, publicado en el número del 22 de octubre de 2004 de *Science*, ha mostrado una manera de hacerlo. Basándose en una idea de Lu Ming Duan, Mikhail Lukin, Ignacio Cirac y Peter Zoller, dos investigadores del Instituto de Tecnología de Georgia, Alex Kuzmich y Dzmitry Matsukevich, entrelazaron un par de nubes de átomos de rubidio ultraenfriados para inscribirles un qubit —las nubes los almacenan mucho más tiempo que los fotones— y transferirlo después a un fotón. Traspasaron, pues, información de la materia a la luz, y una memoria cuántica entregó un bit. Esperan crear mediante ese procedimiento repetidores que transmitan qubits a largas distancias.

La supuesta inviolabilidad de la criptografía cuántica se apoya sobre un conjunto de hipótesis que quizá no se cumplan en el mundo real. Según una de ellas, cada qubit está representado por un fotón y sólo uno. Para efectuar un encriptado cuántico, se disminuye la energía de un láser que funciona a impulsos hasta que sea poco probable que más de uno de cada diez de esos impulsos contenga un fotón —el resto son "oscuros"—; por esa razón es el ritmo de transmisión de datos tan bajo. Pero sólo se trata de una probabilidad estadística. El pulso puede contener más de un fotón. Un espía podría, en teoría, robar los fotones adicionales y descifrar con ellos un mensaje. Un algoritmo de programación —una "amplificación de la intimidad"— protege de esta posibilidad enmascarando los valores de los qubits.

Los criptógrafos quisieran contar con mejores detectores y fuentes de fotones. El norteamericano Instituto Nacional de Pesos y Medidas (NIST) es una de las muchas organizaciones que investigan en esa línea. Tienen interés en construir detectores que distingan entre la llegada simultánea de uno, dos o más fotones. Allí también intentan paliar el problema de la lenta velocidad de transmisión mediante la generación de claves cuánticas a un ritmo de un megabit por segundo, cien veces más deprisa que hasta ahora. Bastaría para distribuir claves en aplicaciones de vídeo.

La criptografía cuántica, con todo, seguiría siendo vulnerable a cierto tipo de ataques. Un espía podría sabotear el detector que recibe los fotones haciendo que los qubits que le llegan pasasen a una fibra, donde se los interceptaría. Y contra la defección interna, contra la mera traición, no hay defensa cuántica que valga.

Bibliografía complementaria

CRIPTOGRAFÍA CUÁNTICA. Charles H. Bennett, Gilles Brassard y Artur K. Ekert en *Investigación y Ciencia*, págs. 14-22; diciembre, 1992.

THE CODE BOOK. Simon Singh. Anchor Books, 1999.

Se puede encontrar información sobre productos de criptografía cuántica en las páginas Web de id Quantique (idquantique.com) y MagiQ Technologies (magiqtech.com).

Geometría no conmutativa y espaciotiempo cuántico

Resultados recientes de la teoría de cuerdas sugieren los primeros modelos de la estructura cuántica del espacio y el tiempo matemáticamente consistentes

José L. Fernández Barbón

Curiosamente, la primera teoría relativista de la historia data de 1864, cuando James Clerk Maxwell escribió sus famosas ecuaciones del electromagnetismo. En la teoría de Maxwell la luz se interpreta como una onda del campo electromagnético. Lo sorprendente es que la velocidad de propagación de estas ondas es una constante, independiente del estado de movimiento del observador. Por supuesto, esta predicción se halla en contradicción directa con la mecánica newtoniana, según la cual la velocidad de cualquier cosa que recibamos será mayor si nos acercamos a la fuente, y menor si nos alejamos de ésta. Se comprende así por qué la paulatina verificación experimental de la teoría de Maxwell acabó conduciendo a una profunda crisis teórica.

En esencia, lo que hizo Einstein en 1905 fue resolver el dilema a favor de Maxwell mediante la construcción de una mecánica que fuera compatible con el extraño comportamiento de la luz. Queda entonces claro que la velocidad de la luz es un límite: si la velocidad de la luz, c, es siempre la misma, no parece posible "perseguir" un rayo de luz, y mucho menos "adelantarlo". En realidad, tales situaciones son imposibles porque en la teoría de Einstein la inercia de un objeto (su resistencia a la aceleración) aumenta con la velocidad, haciéndose infinita cuando alcanza la velocidad de la luz. Es decir, hace falta una energía infinita para dar alcance a un rayo de luz.

Para velocidades pequeñas en comparación con la de la luz (lo que, matemáticamente, viene a ser como tomar un valor infinito de c) las fórmulas de Einstein se aproximan a las de la mecánica newtoniana. Sin embargo, a velocidades cercanas al límite se hacen evidentes todas las predicciones sorprendentes de la relatividad especial, tales como la contracción longitudinal de los objetos en la dirección de movimiento, la ralentización de los relojes móviles o la famosa equivalencia entre masa y energía: $E = mc^2$.

Desde el punto de vista matemático el espacio y tiempo absolutos de Newton quedan fusionados en una nueva entidad denominada *espaciotiempo*, introducida por Hermann Minkowski en 1908. El espaciotiempo de Minkowski tiene cuatro dimensiones, las tres dimensiones espaciales ordinarias más el tiempo. Aunque es geométricamente "plano", matemáticamente resulta peculiar, puesto que el tiempo se comporta como si fuese una coordenada espacial, pero con valores en los números imaginarios. En cualquier caso, la relatividad especial, con el espacio de Minkowski sirviendo de "escenario" pasivo, comparte con la teoría newtoniana el carácter *a priori* del espaciotiempo. Pero la relatividad especial no tiene en cuenta los efectos de la gravitación, como si la constante G de Newton, que determina su intensidad, fuese nula. La segunda parte de la revolución einsteiniana consistió en combinar c y G en una teoría única, la teoría de la relatividad general de 1915. En ella, el espaciotiempo deja de ser pasivo, para adquirir carácter dinámico; el efecto de la gravitación equivale a la *curvatura* del espaciotiempo de Minkowski.

Ya en el siglo XIX, los matemáticos se dieron cuenta de que la geometría de los espacios con curvatura difiere de la geometría euclidiana. Un ejemplo sencillo de espacio con curvatura en dos dimensiones es la superficie de una esfera. De modo análogo, es perfectamente concebible que el mundo físico tridimensional aparezca "curvado" cuando se lo imagina inmerso en un espacio de dimensión superior. Esta intuición llevó a notables matemáticos del siglo XIX, como Gauss o Riemann, a proponer que la geometría es una propiedad física que ha de ser determinada experimentalmente. Fue Einstein el que realizó esta idea de forma concreta, con la premisa de que el espaciotiempo adquiere curvatura en presencia de masas materiales con distribuciones dadas de energía, de acuerdo con un conjunto de ecuaciones de la forma:

$$\text{CURVATURA} = G \times \text{DENSIDAD DE ENERGIA}$$

Estas ecuaciones nos dicen que la constante de Newton, G, mide la "rigidez" del propio espaciotiempo, es decir,

su resistencia a ser curvado por la presencia de energía (en particular, materia). Cuando la densidad de energía es pequeña, que corresponde a campos gravitacionales débiles o a movimientos lentos en comparación con la velocidad de la luz, las ecuaciones de Einstein se aproximan a la ley de Newton, con pequeñas desviaciones que constituyen los tests clásicos de la relatividad general (el desplazamiento del perihelio de Mercurio o la curvatura de la luz en torno al Sol). Las ecuaciones de Einstein predicen además fenómenos cualitativamente nuevos, tales como las ondas gravitacionales, los agujeros negros o la propia expansión del universo.

Una de las nociones familiares de la mecánica celeste es la de "velocidad de escape" de un campo gravitacional, definida como la velocidad mínima necesaria para que un satélite no quede atrapado en ninguna órbita cerrada. Por ejemplo, para el caso de las sondas espaciales *Voyager* que se alejan hasta la parte exterior del sistema solar, la velocidad de escape es de unos 11 kilómetros por segundo. Pues bien, la noción de velocidad de escape sigue siendo válida en la teoría relativista, y su consecuencia más sorprendente es que una masa M comprimida en una esfera de radio inferior a un cierto valor crítico, $R_s = 2GM/c^2$, tendría una velocidad de escape superior a la velocidad de la luz. Esto significa que nada, ni siquiera la propia luz, podría escapar del campo gravitacional de esta masa, justificando el nombre de "agujero negro". El radio crítico R_s, denominado radio de Schwarzschild, representa una superficie de no retorno (llamada *horizonte de sucesos*) ya que, una vez atravesada, es imposible salir de nuevo al exterior. Para hacernos una idea, el radio de Schwarzschild del Sol tiene unos pocos kilómetros. Si toda la masa del Sol se comprimiera por debajo de este radio crítico, la curvatura del espaciotiempo en la vecindad del Sol sería tal, que se convertiría en un agujero negro.

Los agujeros negros no son sólo soluciones exóticas de las ecuaciones de Einstein. Su existencia como objetos astrofísicos asociados a fuentes de rayos X o a los centros de las galaxias está prácticamente aceptada por la comunidad científica. Como veremos, también resultan cruciales en las especulaciones teóricas sobre la teoría cuántica de la gravitación.

El espaciotiempo a través del microscopio cuántico

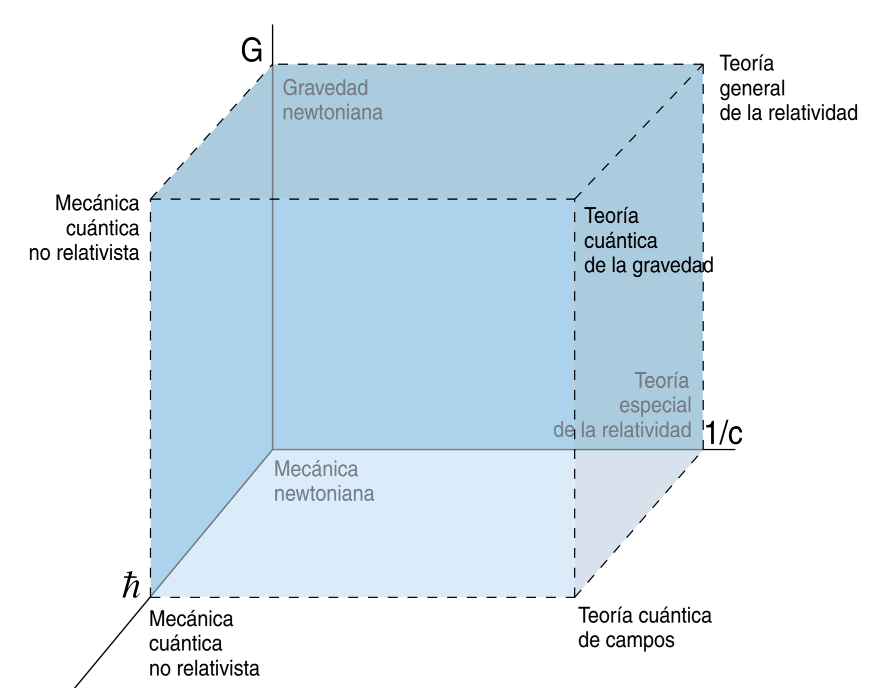
La revolución cuántica fue conceptualmente más radical. Así como la velocidad de la luz controla la estructura del espacio y del tiempo en la relatividad, otra constante universal, $\hbar$, establece otro límite físico infranqueable y dicta el comportamiento de la materia a escala atómica. Representa la acción mínima posible. La *acción* (una magnitud física menos familiar que la velocidad) es el producto de la energía de un cierto proceso físico por el tiempo característico en el que esa energía es liberada. La constante de Planck es, más o menos, la acción típica de un electrón en una órbita atómica. Un fenómeno será clásico cuando su acción resulte mucho mayor que $\hbar$ (es decir, el límite clásico corresponde matemáticamente a $\hbar \to 0$).

La naturaleza de $\hbar$ está ligada a un carácter fundamentalmente "difuso" de las partículas subatómicas. Resulta que la idealización matemática de una partícula como un punto que sigue una trayectoria bien definida es inadecuada cuando la acción de esa trayectoria es del orden de $\hbar$. Es más adecuado imaginar, siguiendo a Feynman, que las partículas cuánticas siguen todas las trayectorias posibles simultáneamente. El movimiento es, al pie de la letra, un promedio entre todas las posibilidades, cada una con un cierto peso estadístico. Esta caracterización del movimiento de las partículas cuánticas se puede elevar a la categoría de principio fundamental de la mecánica cuántica: cuando un proceso se puede realizar a través de varias "historias" alternativas, las leyes de la mecánica cuántica determinan la probabilidad de que ocurra el proceso mediante un promedio adecuado de todas las posibilidades.

Una medida cuantitativa del grado de "fluctuación" de las trayectorias viene dada por la relación de indeterminación de Heisenberg. De acuerdo con este resultado fundamental, el producto de las indeterminaciones en posición, ΔX, y en impulso, ΔP, de una partícula ha de ser mayor que la constante de Planck. En fórmulas: $\Delta X\,\Delta P \geq \hbar/2$, donde el impulso está definido como el producto de la masa por la velocidad, $P = m \times v$. Para definir una trayectoria con exactitud es necesario especificar la posición y velocidad de la partícula en un momento dado, pero esto es imposible, ya que la precisión absoluta de la posición, $\Delta X \to 0$, implica una incertidumbre total en la velocidad, $\Delta P \to \infty$, y viceversa. Desde el punto de vista pragmático, la consecuencia más importante de las relaciones de Heisenberg es que los microscopios cuánticos cuestan mucha energía. En efecto, para estudiar un sistema físico con una precisión espacial de orden ΔX, hace falta comunicar un impulso de orden $\hbar/\Delta X$ a esa región del espacio. Como el impulso cuesta energía, se explica así por qué son necesarios aceleradores cada vez más energéticos para estudiar distancias cada vez más diminutas.

Las relaciones de Heisenberg son la expresión gráfica de la estructura matemática de la mecánica c uántica. Estas matemáticas, un tanto exóticas, se basan en que la posición y el impulso no son números ordinarios, sino objetos denominados *matrices*. La característica definitoria de las matrices es que, al multiplicarlas, el orden de los factores *sí altera* el producto. Es lo que se denomina una multiplicación "no conmutativa". En símbolos: $X \times P$ no es lo mismo que $P \times X$ en el mundo cuántico, donde $\hbar \neq 0$. Es decir, la limitación física impuesta por la existencia de $\hbar$ está asociada a una no conmutatividad fundamental entre posiciones y velocidades.

El intento de aplicar las leyes de la mecánica cuántica a partículas relativistas (con velocidades próximas a c) lleva directamente a la teoría cuántica de campos. La novedad principal de la teoría cuántica de campos es que trata de *colectivos* de partículas, de forma que las partículas individuales pueden crearse y destruirse localmente. Según la ecuación de Einstein, $E = mc^2$, la energía "condensada" en forma de masa no es diferente en esencia de otras formas de energía. Así que la energía de movimiento de partículas suficientemente rápidas puede condensarse en forma de otras partículas con masa, y viceversa; una partícula pesada puede donar su energía de reposo desinte-



1. MAPA DE LAS TEORIAS FISICAS: según aparezcan en ellas las tres constantes fundamentales (G, $\hbar$, c) con su valor real o con su límite nulo o infinito. La síntesis final sería una teoría de los fenómenos físicos válida para los valores finitos de c, $\hbar$ y G sin tener que tomar límites simplificadores; es decir, una teoría cuántica de la gravitación, que recuperaría las demás teorías parciales como límites particulares. Esa teoría sigue representando la frontera de la investigación.

grándose espontáneamente en otras partículas. El principio fundamental de la mecánica cuántica nos dice que debemos promediar sobre todas las alternativas posibles en la historia de un proceso dado. Por ejemplo, si una partícula A se puede desintegrar en otras partículas B y C, que a su vez se pueden aniquilar mutuamente y crear A, este proceso $A \to B + C \to A$ sucederá con una cierta probabilidad como "historia intermedia".

En un sentido operacional, las relaciones de Heisenberg siguen siendo ciertas en el caso relativista, de forma que ΔX y ΔP todavía representan la precisión en la medida de posición y de impulso, aunque esta medida no involucre necesariamente una sola partícula. Lo que parece una trayectoria fluctuante de una sola partícula cuando se analiza con un "microscopio" de baja resolución espacial (es decir, con un acelerador de partículas de baja energía), se vuelve una cascada recurrente de procesos de creación y aniquilación de múltiples partículas al aumentar la energía del acelerador. Para procesos a energías muy altas, el impulso y la energía son proporcionales. De aquí se deduce, usando las relaciones de Heisenberg, que la máxima precisión posible en nuestras mediciones es inversamente proporcional a la energía comunicada a la región del espacio, de acuerdo con la fórmula básica $L \approx \hbar c/E$.

La recurrencia *ad infinitum* en la formación de cascadas de partículas a medida que aumentamos la energía es una característica esencial de la teoría cuántica de campos que, no obstante, complica mucho su estructura matemática. La elaboración del delicado formalismo matemático necesario no se alcanzó hasta 1948 para el caso de las interacciones entre electrones y fotones, con los trabajos de Schwinger, Tomonaga, Feynman y Dyson. Para el resto de las partículas del modelo estándar la solución no llegaría hasta 1971, de la mano de los holandeses 't Hooft y Veltman. Las teorías de campos que satisfacen este rígido requerimiento matemático se llaman *renormalizables* en la jerga de los físicos. El actual "modelo estándar" es la teoría renormalizable más general compatible con su contenido en partículas y sus simetrías.

El espaciotiempo de la teoría cuántica de campos es minkowskiano: la fuerza gravitacional entre las partículas subatómicas es tan pequeña, que los efectos de G son despreciables a escala atómica (es la teoría del límite $G \to 0$). Ahora bien, nuestra capacidad de medir las propiedades geométricas del espacio de Minkowski queda condicionada por las leyes de la mecánica cuántica. Desde el punto de vista práctico, esta limitación se traduce en la regla del "microscopio cuántico": una precisión hasta distancias de orden L requiere la concentración de una cantidad de energía $\hbar c/L$. Además, la "medida" no puede realizarse analizando el comportamiento de partículas individuales, sino que el aumento de la energía necesariamente trae consigo la proliferación de los procesos de creación y aniquilación de partículas. Los grandes aceleradores de partículas, como el LEP, del laboratorio europeo de física de partículas (CERN), se convierten así en los microscopios más potentes. Alcanzando energías de cien veces la masa en reposo del protón, miden la estructura del espaciotiempo hasta distancias de 10^{-15} centímetros, una diezmilésima del tamaño del protón. Hasta ahí, se ha comprobado que las miles de predicciones del modelo estándar, dependientes de unos veinte parámetros numéricos determinados experimentalmente, representan una descripción fiel de la física microscópica. La próxima generación de aceleradores, como el Tevatrón de Fermilab, ya en funcionamiento en EE.UU., y sobre todo el LHC, en construcción en el CERN, constituirán "microscopios" al menos diez veces más potentes.

Gravitación cuántica y distancia mínima

La identificación einsteiniana entre la gravitación y la geometría tiene una consecuencia inmediata: que una teoría cuántica de la gravitación implica una estructura cuántica del propio espaciotiempo. Se plantea entonces la cuestión de qué nuevo límite de la Naturaleza será desvelado, por analogía con los límites asociados a c y $\hbar$. Aun sin disponer todavía de una teoría precisa de la gravitación cuántica, podemos adelantar argumentos que sugieren el establecimiento de una distancia física mínima.

La aplicación directa de las reglas de la mecánica cuántica a la teoría

JOSE L. FERNANDEZ BARBON

de la gravitación de Einstein da lugar a inconsistencias matemáticas. Lo más fácil es intentar formular una teoría cuántica de las ondas gravitacionales, “arrugas” o vibraciones de la geometría espaciotemporal similares a las ondas electromagnéticas. Cuánticamente, se pueden ver como conjuntos coherentes de partículas, de la misma manera que una onda electromagnética es un conjunto coherente de fotones. Los análogos gravitacionales de los fotones se denominan *gravitones*.

A las energías de los laboratorios actuales, los gravitones individuales interaccionan de manera tan débil, que siempre se han escapado a una detección directa. Resulta, sin embargo, que las interacciones entre gravitones producen cascadas de creación y aniquilación demasiado violentas a medida que consideramos distancias cada vez menores (o energías cada vez mayores), de tal forma que la delicada estructura matemática que funcionaba para las demás partículas del modelo estándar fracasa estrepitosamente para los gravitones. En la jerga de los físicos, la teoría cuántica de los gravitones no es *renormalizable*.

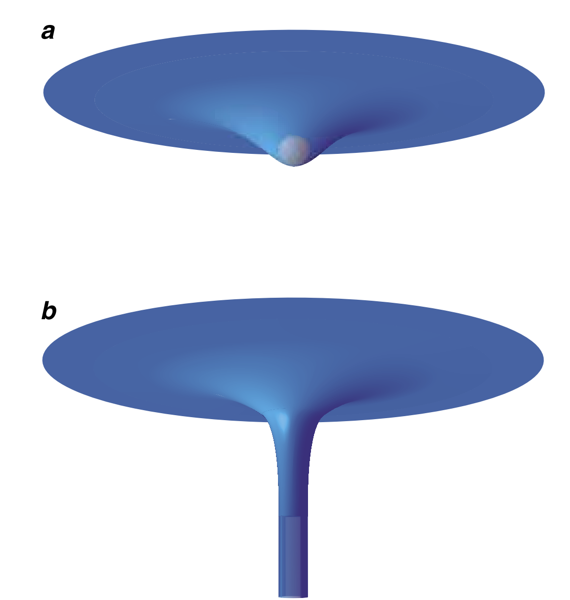
La experiencia con otros casos similares de teorías no renormalizables sugiere una explicación posible: que el gravitón no sea una partícula “fundamental”, sino que tenga “componentes” a una escala de distancias determinada por la intensidad intrínseca de la interacción gravitacional. Si esta idea es correcta, el gravitón revelaría sus componentes en la vecindad de la escala de Planck: $L_p = \sqrt{G\hbar/c^3}$, la única magnitud con dimensiones de longitud que se puede formar con las tres constantes fundamentales de la física, c, $\hbar$ y G. Numéricamente, vale unos 10^{-33} centímetros, una distancia fantásticamente pequeña, mucho más allá de nuestra capacidad técnica en la construcción de aceleradores de partículas.

La longitud de Planck es importante por otra razón, posiblemente más profunda. Hemos visto que necesitamos concentrar una energía del orden de $\hbar c/L$ para alcanzar una resolución de distancias de orden L. Pues bien, la energía necesaria para medir la estructura del espaciotiempo con una precisión del orden de la escala de Planck es tal, que en esa región se formaría un agujero negro microscópico con un radio de Schwarzschild del mismo orden de magnitud. Esto significa que las fluctuaciones cuánticas que cambian la estructura geométrica e incluso topológica del espaciotiempo, tales como agujeros negros microscópicos, son tan importantes como los gravitones cuando alcanzamos la escala de Planck. Esta es la vieja idea de Wheeler, que habló de la estructura “espumosa” del espaciotiempo cuántico. Por otra parte, que las fluctuaciones cuánticas puramente gravitacionales adquieran la misma magnitud que las fluctuaciones cuánticas descritas por el modelo estándar también sugiere que todas las interacciones de la Naturaleza están unificadas a distancias del orden de la escala de Planck.

Un intento de utilizar el microscopio cuántico para mejorar la precisión espacial más allá de la longitud de Planck requeriría un aumento de la energía disponible. Como los agujeros negros crecen en tamaño al aumentar su energía, la consecuencia sería la formación de un agujero negro mayor que la longitud de Planck, con lo que no se logra mejorar la precisión. Así pues, resulta que la posibilidad de producir agujeros negros como fluctuaciones cuánticas pone un límite operativo al funcionamiento del “microscopio de Heisenberg”: existiría una distancia efectiva mínima. Por esta razón, los físicos creen en su mayoría que la construcción de una teoría cuántica de la gravitación requerirá una revolución de características similares a las revoluciones relativista y cuántica, en el sentido de que introducirá un nuevo límite en la Naturaleza, ahora en la escala de distancias.

El carácter central de los agujeros negros cuánticos en los argumentos anteriores plantea la cuestión de si podemos encontrar pistas importantes sobre gravitación cuántica en el estudio de los agujeros negros macroscópicos (los que están bien descritos clásicamente por la relatividad general). Esta estrategia ya funcionó históricamente en el descubrimiento de la propia mecánica cuántica. En aquella ocasión, aunque se disponía de una buena descripción clásica de la radiación electromagnética (la teoría de Maxwell), el estudio por parte de Planck de sus propiedades termodinámicas condujo a los primeros ejemplos de comportamiento cuántico.

La aplicación de la mecánica cuántica a un agujero negro macroscópico produce resultados sorprendentes. Debido al carácter unidireccional del horizonte de sucesos (se puede entrar pero no salir) resulta que un par partícula-antipartícula creado espontáneamente por una fluctuación cuántica puede perder uno de los componentes detrás del horizonte, alterándose el balance de las fluctuaciones cuánticas en sus proximidades. Como demostró Stephen Hawking en su famoso trabajo de 1974, el efecto neto de este proceso es una radiación emitida por el agujero negro. Esta radiación está alimentada por la energía del campo gravitacional y tiene una temperatura característica, llamada temperatura de Hawking, que es inversamente proporcional a la masa del agujero negro.



JOSE L. FERNANDEZ BARBON

2. EN LA TEORIA GENERAL DE LA RELATIVIDAD, la fuerza gravitacional se reinterpreta como la curvatura del espaciotiempo en las proximidades de un objeto masivo (*a*). Cuando la energía está suficientemente concentrada, la deformación del espaciotiempo puede cambiar su estructura topológica, formándose un agujero negro (*b*). En un sistema de coordenadas adecuado, un agujero negro puede representarse como un “tubo infinito”, en cuyo extremo se halla el horizonte de sucesos.

Aplicando entonces argumentos generales de termodinámica, parecidos a los usados por Planck hace un siglo en el caso de la radiación electromagnética, podemos deducir el número de estados microscópicos que debería albergar el agujero negro para poder radiar con esa temperatura. El resultado es que el agujero negro se puede describir como un sistema cuántico con una unidad de información por cada unidad de área del horizonte, en unidades de la longitud de Planck. Una conclusión que concuerda con deducciones de carácter más heurístico realizadas unos años antes por Jacob Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, y corrobora la idea de que la longitud de Planck es una distancia mínima en la gravitación cuántica.

Hacia un nuevo paradigma

Las consideraciones anteriores son sugestivas pero imprecisas. Para progresar se requiere una teoría de gravitación cuántica, aunque sea de naturaleza aproximada: por ejemplo, un modelo concreto de la estructura interna del gravitón a la escala de Planck. De todas las ideas propuestas hasta la fecha, la teoría de cuerdas representa el marco teórico más prometedor en esa línea. Desarrollada inicialmente en torno a 1970 como una teoría imperfecta de las fuerzas nucleares, languideció durante una década para emerger en 1984 como el marco general para construir teorías de la gravitación cuántica que incorporen, además, la unificación de todas las interacciones incluidas en el modelo estándar.

El punto de partida de la teoría de cuerdas es una hipótesis aparentemente modesta y un tanto arbitraria. La idea es que las partículas que denominamos "elementales" son en realidad objetos extensos en una dimensión; cuerdas diminutas cuya dinámica está especificada por modos de vibración. Cada modo de vibración independiente representaría un tipo diferente de partícula del modelo estándar; todos serían manifestaciones del mismo objeto básico, la cuerda fundamental. De ser cierta, esta hipótesis unificaría todas las partículas subatómicas. Por ahora se ha visto que conduce a una estructura matemática de riqueza insospechada, cuya exploración por parte de físicos y matemáticos aún pertenece en gran medida a las generaciones futuras.

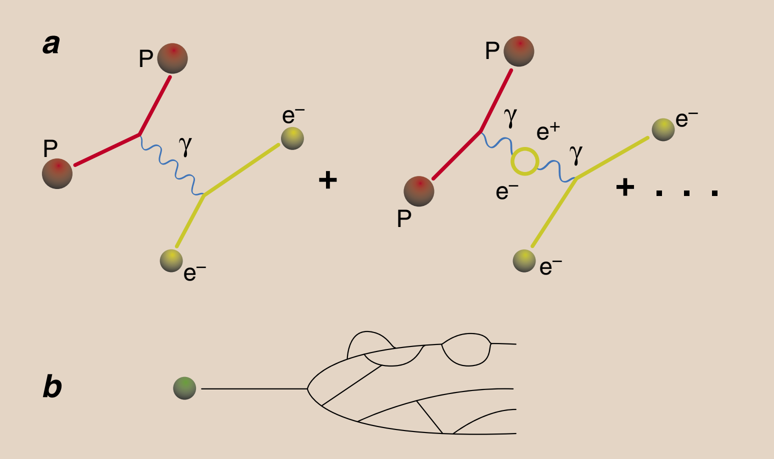
Desde el punto de vista físico, las teorías de cuerdas tienen propiedades bastante sorprendentes. Hay dos clases básicas de cuerdas, según sean cerradas sobre sí mismas, a modo de anillos, o abiertas, con dos extremos libres. Las cuerdas cerradas siempre tienen un modo de vibración que se puede identificar con el gravitón, mientras que las cuerdas abiertas siempre tienen un fotón. El resultado es que las cuerdas "predicen" la existencia de gravitación en el sector cerrado, y de interacciones de tipo aforo, o *gauge* (como la interacción electromagnética), en el sector abierto. Por otra parte, al ser objetos extendidos sobre una distancia del orden de la longitud de Planck, las cuerdas interaccionan con "suavidad" a distancias muy cortas. Por tanto, las cuerdas cerradas proporcionan un modelo (el único conocido) de la estructura compuesta del gravitón a la escala de Planck, y son la versión microscópica de las "excitaciones" del propio espaciotiempo.

Además de la gravitación y las interacciones del modelo estándar, la teoría de cuerdas tiene otras predicciones "genéricas" que añaden una gran complicación a su estudio. Una es la existencia de más de cuatro dimensiones espaciotemporales, hasta un total de once como máximo. Las dimensiones extra serían invisibles por estar curvadas en pequeños círculos, esferas u otras formas geométricas más intrincadas. La gran variedad de estructuras microscópicas que pueden adoptar las dimensiones adicionales son útiles a la hora de reproducir todas las estructuras visibles en el modelo estándar, pero por otra parte dejan abiertas muchas posibilidades que, *stricto sensu*, restan predictibilidad a la teoría.

Otra predicción concreta de las teorías de cuerdas es la aparición de nuevas simetrías en la Naturaleza. La más importante es la llamada *supersimetría*, que en cierto sentido

Procesos elementales

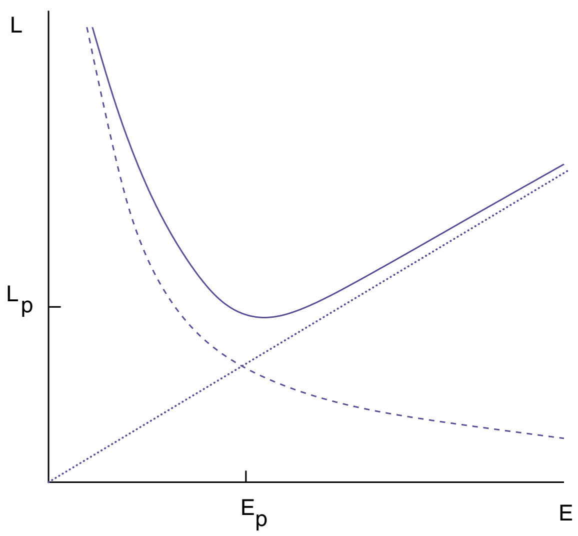
LOS PROCESOS ELEMENTALES que contribuyen a la interacción entre un protón (*P*) y un electrón (e^-) en teoría cuántica de campos revisten particular interés (*a*). El protón emite un fotón (una partícula de luz, γ) en un punto del espaciotiempo. El fotón es absorbido en otro punto del espaciotiempo por el electrón, aunque existe una cierta probabilidad de que este fotón genere espontáneamente un par electrón-positrón de vida breve o promueva incluso procesos más complicados. La posición de los "vértices", en los que hay creación o aniquilación espontánea de partículas, así como las trayectorias entre dos vértices consecutivos, están sujetas a fluctuaciones cuánticas. Los cálculos detallados demuestran que la suma coherente de todas estas "historias" alternativas es la versión cuántica de la fuerza electromagnética entre el protón y el electrón. De ahí la expresión "teoría cuántica de campos". En (*b*), la trayectoria de una partícula sufre bifurcaciones por cascadas de creación y aniquilación de partículas. Estos efectos son muy significativos a energías suficientemente altas.



JOSE L. FERNANDEZ BARBON

unifica las partículas asociadas a las fuerzas, como el fotón y el gravitón, con las partículas asociadas a la materia, como el electrón, los quarks y los neutrinos. No obstante, esta simetría sólo se puede realizar de forma aproximada en la Naturaleza, ya que no es una propiedad del modelo estándar. Una de las perspectivas experimentales más excitantes para la nueva generación de aceleradores de partículas, como el LHC del CERN, sito en Ginebra, es la posibilidad de descubrir dimensiones adicionales del espaciotiempo, supersimetría o ambas novedades características de la teoría de cuerdas. Si bien esto no supondría una verificación inmediata de la teoría de cuerdas, se trataría de un fuerte indicio experimental en esta dirección.

Uno de los descubrimientos más importantes en teoría de cuerdas, debido a Joseph Polchinski, del Instituto de Física Teórica de California en Santa Bárbara, fue la observación de que las cuerdas mismas no son los únicos objetos fundamentales de la teoría. Habíamos visto que las cuerdas aparecen en dos modalidades: las cerradas, asociadas a la gravitación, y las abiertas, asociadas a las interacciones de aforo, o *gauge* (como el electromagnetismo). Los extremos de estas cuerdas abiertas pueden propagarse libremente por todo el espacio, pero también pueden estar localizados en regiones singulares con dimensiones variables. Estas regiones singulares a las cuales las cuerdas abiertas estarían "enganchadas" se conocen como *D*-branas en la jerga técnica. Literalmente, son como "impurezas" o defectos estructurales del espaciotiempo, cuyas propiedades dinámicas están caracterizadas por el estado de vibración de su "cabellera" de cuerdas abiertas. Las *D*-branas pueden ser objetos puntuales, y hablamos entonces de *D*-partículas, o tener una dimensión extendida (*D*-cuerdas), dos dimensiones extendidas (*D*-membranas), etc. Si las cuerdas cerradas representan fluctuaciones del espaciotiempo, se puede decir que las cuerdas abiertas representan las fluctuaciones de las *D*-branas.



3. SEGUN EL PRINCIPIO DE HEISENBERG, una energía E permite alcanzar una precisión $L = \hbar c/E$ (*línea intermitente*). Por el contrario, si toda la energía colapsa en un agujero negro, su tamaño aproximado, $L = L_p^2 E/\hbar c$, crece linealmente con la energía (*línea de puntos*). Combinando ambos efectos se obtiene la modificación planckiana del principio de Heisenberg, incluyendo la distancia mínima $L_p = \sqrt{G\hbar/c^3}$.

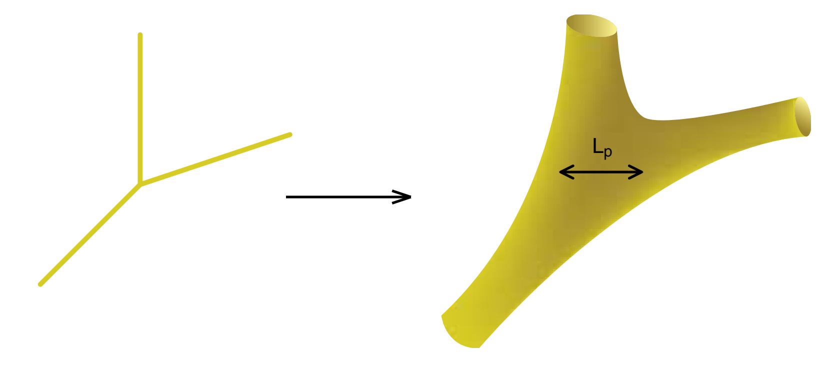
Así pues, el espectro de objetos "elementales" en teoría de cuerdas contiene no sólo las cuerdas mismas (cuyas vibraciones más ligeras darían las partículas del modelo estándar), sino también las impurezas en la estructura del espaciotiempo denominadas *D*-branas. Por último, cuando las cuerdas o las *D*-branas alcanzan un alto grado de excitación sobre su estado de mínima energía, se convierten en agujeros negros.

La transición entre *D*-branas y agujeros negros se entiende bastante bien a nivel cuantitativo. En un importante cálculo, Andrew Strominger y Cumrum Vafa, de la Universidad de Harvard, demostraron que el número de estados de un agujero negro (según la predicción de Bekenstein y Hawking) coincide, en el punto de transición, con el de un sistema adecuado de *D*-branas. Hoy por hoy, el cálculo sólo se puede realizar con detalle para un cierto tipo de agujeros negros con mucha simetría, para los cuales se conoce bien su estructura microscópica en términos de cuerdas y *D*-branas. La generalización del cálculo de Strominger y Vafa a cualquier tipo de agujero negro sigue siendo un problema abierto, pero el éxito en casos particulares es matemáticamente tan intrincado y preciso, que deja pocas dudas sobre la validez del modelo en los casos en que es aplicable.

Geometría no conmutativa

Tenemos así una imagen globalmente coherente en la que el modelo estándar y los agujeros negros cuánticos son dos límites extremos de una estructura microscópica más rica. Incorpora además los ingredientes necesarios para la construcción de una teoría cuántica del espaciotiempo, con una distancia física mínima del orden de la longitud de Planck.

Esta situación nos recuerda los resultados de la vieja teoría cuántica de principios de los años veinte, basada en conceptos heurísticos



4. EN TEORIA CUANTICA DE CAMPOS las interacciones son "duras", en el sentido de que las partículas se crean o aniquilan instantáneamente en un punto del espaciotiempo. Estas interacciones duras son matemáticamente inconsistentes para el caso de los gravitones. En teoría de cuerdas, por el contrario, las interacciones se distribuyen en una región finita del espaciotiempo, con una extensión del orden de la longitud de Planck.

JOSE L. FERNANDEZ BARBON



5. TRES EJEMPLOS DE D-BRANAS: de dimensión cero, uno y dos. Las *D*-branas son objetos singulares en el espacio, en los cuales están confinados los extremos de las cuerdas abiertas. Todas las propiedades físicas de las *D*-branas se definen en términos del estado de vibración de sus cuerdas abiertas.

tales como el de la dualidad onda-corpúsculo. Esta dualidad, o la más general *complementariedad* de Bohr, adquieren un contenido cuantitativo con las relaciones de indeterminación de Heisenberg. Sin embargo, a un nivel más profundo sabemos que estas relaciones de indeterminación son una consecuencia de la estructura matemática subyacente a la mecánica cuántica. En aquella ocasión el principio básico resultó ser la *no conmutatividad* entre posiciones y velocidades. Siguiendo con nuestra analogía, sería conveniente abstraer un formalismo más fundamental a partir de la teoría de cuerdas y branas, en el cual la distancia mínima de Planck estuviera incorporada de manera intrínseca. En otras palabras, buscamos un principio de *no conmutatividad* puramente espaciotemporal.

Un ejemplo del tipo de estructura matemática necesaria fue descubierto por Alain Connes en los años ochenta. Este matemático francés inventó una geometría cuántica en la cual las coordenadas espaciales son matrices que no conmutan entre sí, en analogía exacta con las posiciones y velocidades de un electrón. Entonces se puede copiar la demostración de los libros de texto de las relaciones de Heisenberg, y obtener un conjunto de relaciones análogas entre las coordenadas espaciales. Por ejemplo, para un plano no conmutativo con coordenadas X e Y, se verifica que las precisiones respectivas en la medida de las posiciones satisfacen $\Delta X\, \Delta Y \geq L_c^2$, donde L_c^2 representa el área mínima físicamente realizable. En el ámbito de la física, sugerencias en esta línea se remontan al trabajo de Snyder en 1949, y más recientemente, en 1983, al de Antonio González Arroyo, de la Universidad Autónoma de Madrid, y Chris Korthals-Altes del CNRS en Marsella. El principal problema en la aplicación literal de estas ideas a la teoría de cuerdas es la dificultad de obtener efectos gravitacionales en el formalismo de Connes. Es decir, no parece haber una relación natural entre L_c y la longitud de Planck, L_p.

Las cuerdas abiertas poseen propiedades matemáticas que recuerdan la geometría de Connes, como había observado ya en 1986 Edward Witten, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Con el advenimiento de las *D*-branas, el propio Witten resaltó este hecho de forma más explícita. La posición de una *D*-brana en el espacio, como el resto de sus propiedades físicas, depende del estado de vibración de las cuerdas abiertas atrapadas en ella. Si tenemos dos *D*-branas, digamos A y B, colocadas a una cierta distancia, sus posiciones dependerán de las cuerdas abiertas enganchadas en cada una de ellas, pero también de las cuerdas abiertas que tienen un extremo en A y el otro extremo en B. En otras palabras, la posición de una *D*-brana no se puede definir individualmente, sino que requiere el conocimiento del estado de cualesquiera *D*-branas que existan en sus inmediaciones. Matemáticamente, se puede demostrar que estas propiedades convierten la posición de una *D*-brana en una matriz, del mismo tipo que las matrices inventadas por Heisenberg en su creación de la mecánica cuántica.

Basándose en estas ideas, Tom Banks, de la Universidad de Rutgers, Willy Fischler, de la Universidad de Texas en Austin, y Stephen Shenker y Leonard Susskind, de Stanford, propusieron en 1996 que las *D*-branas son los objetos más fundamentales. Más exactamente, presentaron la hipótesis de que el espaciotiempo mismo está construido como un estado colectivo de un número infinito de *D*-branas. El espaciotiempo adquiere así una naturaleza "granular" a la escala de Planck; una especie de "retículo" de *D*-branas trenzadas mediante las cuerdas abiertas. Las *D*-branas pasan de ser "defectos estructurales" en el continuo espaciotemporal a representar los propios "ladrillos básicos" del espaciotiempo. En la práctica, esto

JOSE L. FERNANDEZ BARBON

El espectro de estados de la teoría de cuerdas

LA ESCALA DE MASAS de las partículas del modelo estándar se extiende en torno a la masa del bosón *W*, unas 80 veces la del protón; el espectro va desde las partículas sin masa, como el fotón y el gravitón, hasta el quark *top*, unas 170 veces más pesado que el protón. Todas estas partículas aparecerían como los modos más bajos de vibración de las cuerdas. A una escala intermedia, M_s, encontramos los modos de vibración superiores de las cuerdas; más arriba, las *D*-branas. Por último, por encima de la masa de Planck, $M_p = \sqrt{\hbar c/G}$, las excitaciones típicas generan agujeros negros. En la mayoría de los modelos, M_s y M_p son comparables, del orden de 10^{19} veces la masa del protón. Sin embargo, es posible construir modelos en los que estas escalas de masa toman valores muy bajos, de sólo unas 1000 veces la masa del protón.

equivale a derivar todos los objetos de la teoría de cuerdas, incluyendo las cuerdas cerradas y los agujeros negros, a partir de las variables matriciales de las cuerdas abiertas. El estudio intensivo de la así llamada "teoría de matrices BFSS" confirmó en parte estas expectativas para el caso del espaciotiempo más simétrico posible: el de Minkowski en once dimensiones.

Dadas estas consideraciones, no resulta sorprendente que la teoría BFSS contenga la geometría de Connes como un caso particular; poco más tarde lo demostraría el propio Alain Connes, con la colaboración de Michael Douglas, de la Universidad de Rutgers, y Albert Schwarz, de la Universidad de California en Davis. No obstante, los principales problemas de la teoría de matrices BFSS son sus limitaciones a la hora de reproducir fenómenos gravitacionales más generales. En otras palabras, no es posible obtener un espacio con curvatura en el límite de grandes distancias, sino sólo variantes del espaciotiempo de Minkowski.

Esta situación mejoró considerablemente a finales de 1997 con el trabajo fundamental de Juan Maldacena, entonces en Harvard y hoy en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Considerando una configuración de *D*-branas diferente de la discutida por Banks, Fischler, Shenker y Susskind, generó un espaciotiempo con curvatura. Esencialmente, Maldacena estudió el mismo tipo de configuraciones de *D*-branas que habían utilizado antes Strominger y Vafa en su cálculo del número de estados de los agujeros negros. Por esa razón, los espaciotiempos así generados son geométricamente equivalentes a la región cercana al horizonte de ciertos agujeros negros. El sistema está descrito por las excitaciones de las cuerdas abiertas, que constituyen una teoría de matrices (técnicamente, una versión supersimétrica de las teorías de aforo del modelo estándar). Cuando el número de *D*-branas es grande, el sistema se describe mejor como un espaciotiempo curvado, donde reemplazamos las *D*-branas y sus cuerdas abiertas asociadas por una cierta geometría semejante a un agujero negro. La conjetura de Maldacena consiste en la equivalencia exacta de ambas descripciones. Las excitaciones de cuerdas cerradas en el "agujero negro" tienen la misma información física que el conjunto de cuerdas abiertas enganchadas en las *D*-branas.

La propuesta de Maldacena fue mejorada y generalizada por Edward Witten, e independientemente por Stephen Gubser, Alexander Polyakov e Igor Klebanov, de la Universidad de Princeton. El resultado es un conjunto de reglas, bajo el nombre genérico de "dualidad AdS/CFT", que dan una definición exacta de la gravedad cuántica para cierto tipo de espaciotiempos con curvatura, en términos de las variables matriciales de sistemas apropiados de *D*-branas.

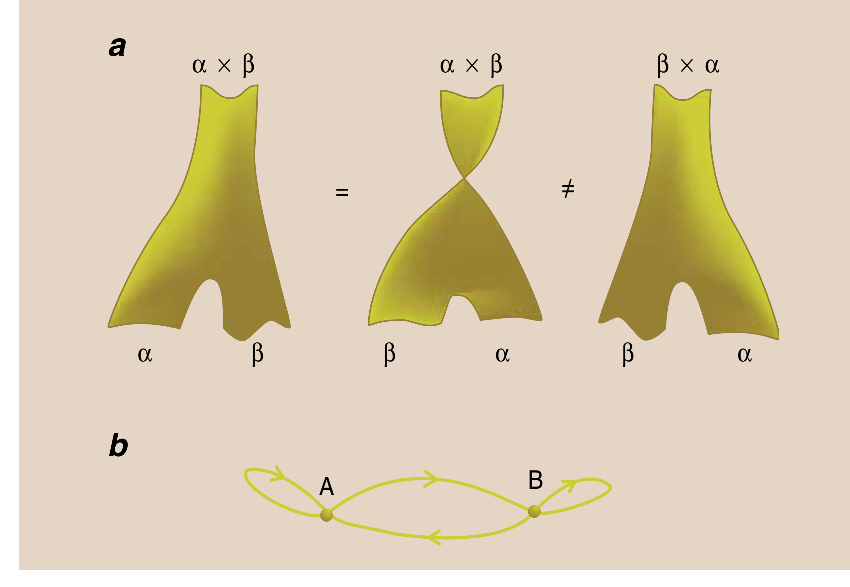
Se puede decir que la esencia de la dualidad AdS/CFT y del modelo BFSS es la "deconstrucción" de la geometría en términos del álgebra de las matrices. La configuración microscópica de un sistema infinito de *D*-branas codifica la estructura del espaciotiempo que aparece a grandes distancias como el continuo utilizado por Einstein en su teoría general de la relatividad. Aunque estos modelos han revolucionado nuestras ideas sobre la naturaleza del espaciotiempo, por el momento carecemos de una teoría general de la "deconstrucción geométrica". La elaboración de modelos cuánticos del espaciotiempo constituye un arte, en el sentido de que cada ejemplo concreto requiere trucos matemáticos especiales. Hasta el momento, sólo algunas geometrías con suficiente cantidad de supersimetría han sido codificadas con éxito. Por esta razón, sería conveniente extraer el principio básico que hace posibles estas construcciones, con objeto de encontrar ejemplos más realistas.

El principio holográfico

Un candidato a ocupar el papel de "principio rector" de la nueva geometría cuántica podría ser el *principio holográfico*, formulado en 1993 por

La no conmutatividad de las cuerdas

LOS ESTADOS de cuerdas abiertas son, de forma natural, no conmutativos. En (*a*) consideramos el producto de dos cuerdas abiertas α y β para producir una cuerda con estado $\alpha * \beta$. Este mismo proceso se puede escribir intercambiando el orden de α y β, a costa de "retorcer" la superficie generada por las cuerdas en su movimiento. Claramente, la superficie resultante difiere del producto de β y α para dar $\beta * \alpha$. En (*b*), dos *D*-partículas *A* y *B* con cuatro tipos de cuerdas abiertas: *AA*, *BB*, *AB*, *BA*. La posición de las *D*-branas en cada dirección del espacio depende de cuatro números, que caracterizan el estado de las cuatro clases de cuerda abierta. Estos cuatro números forman una *matriz*, el objeto matemático esencialmente no conmutativo. La matriz se vuelve conmutativa cuando las cuerdas *AB* y *BA* se anulan. En este caso las posiciones de *A* y *B* se pueden definir como independientes entre sí, sin interferencia cuántica.



JOSE L. FERNANDEZ BARBON

Gerard ‘t Hooft, de la Universidad de Utrecht, y sistematizado por Leonard Susskind, de la Universidad de Stanford, y Raphael Bousso, de la Universidad de Berkeley. El principio holográfico se basa en la fórmula de Bekenstein y Hawking para la capacidad de información que puede almacenar un agujero negro (*véase* “La información en el universo holográfico”, de Jacob D. Bekenstein en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2003). Según aquellos autores, los estados cuánticos se pueden asociar a los grados de libertad sobre el área del horizonte, con una densidad de una unidad de información por cada área planckiana.

Es significativo que la capacidad de información crezca con el área del agujero negro, y no con su volumen. Esta conclusión choca frontalmente con las ideas basadas en una teoría cuántica de campos, tal como el modelo estándar, formulada en el espaciotiempo ordinario. En una teoría cuántica de campos los estados físicos se pueden caracterizar por las configuraciones de las partículas. Como podemos colocar una partícula en cada punto del espacio (con una precisión dada), la cantidad máxima de información crecería con el volumen del espacio. Sin embargo, un momento de reflexión revela que en muchos de estos estados las partículas estarían tan densamente empaquetadas, que colapsarían gravitacionalmente para formar un agujero negro. Una vez que hemos formado el agujero negro, la capacidad de información crece con el área y no con el volumen (o, dicho de otra manera, como la información equivale, salvo una constante, al logaritmo del número de estados que puede adoptar el sistema, el número de estados crece con la exponencial del área en vez de con la del volumen).

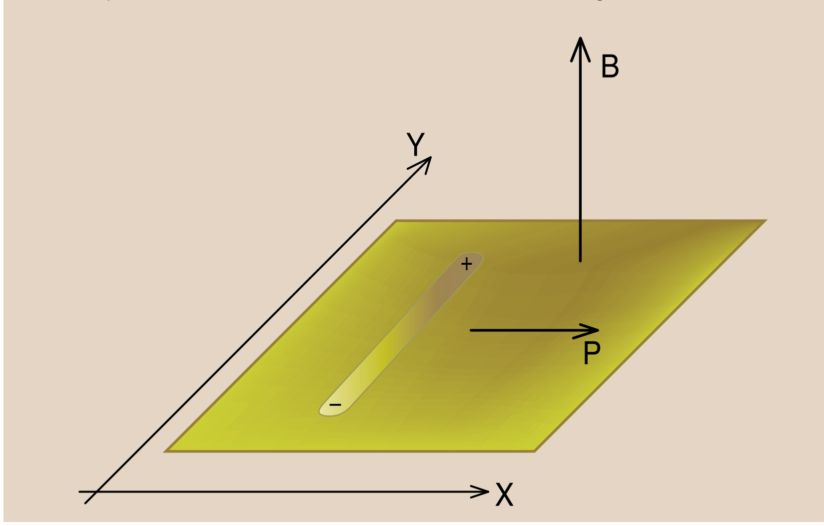
El principio holográfico toma esta observación y la eleva a la categoría de propiedad fundamental de cualquier teoría de gravitación cuántica. De acuerdo con este principio, la formulación matemática de una teoría de gravitación cuántica debería hacer uso de variables que residen en la superficie de una región dada, no en su interior. La interpretación radical diría que las tres dimensiones del espacio son una ilusión basada en nuestra experiencia con estados “diluidos”. Al igual que un holograma codifica una imagen tridimensional en un sistema bidimensional, la formulación básica de la gravitación cuántica tendría como mucho dos dimensiones espaciales macroscópicas. Las dimensiones restantes aparecerían dinámicamente como aproximación de bajas energías. Sin embargo, a energías suficientemente altas la generación de agujeros negros mediante fluctuaciones cuánticas convertiría el espacio tridimensional en un concepto poco útil para describir los fenómenos.

El principio holográfico y el conjunto de ideas relacionadas siguen siendo un proyecto de paradigma, más que una teoría concreta. Sin embargo, su formulación no está sujeta a restricciones tales como la cantidad de supersimetría presente en el espaciotiempo, y sólo depende de propiedades muy robustas de la física de agujeros negros. Por esta razón, la mayoría de los físicos teóricos creen que el principio holográfico es una de las piedras angulares del espaciotiempo cuántico.

En casos de gran simetría, modelos como AdS/CFT o la teoría matricial de BFSS proporcionan un laboratorio teórico que representa muchas propiedades del principio holográfico en una situación matemáticamente tratable. En cierto modo, el modelo de Maldacena es a la holografía lo que el átomo de hidrógeno a la mecánica cuántica. En el descubrimiento de la mecánica cuántica resultó fundamental disponer de un sistema suficientemente simple como para admitir tratamiento matemático preciso y, a la vez, suficientemente característico como para ilustrar muchas de las propiedades distintivas de la mecánica cuántica. Por desgracia, el paralelismo acaba ahí, ya que el átomo de hidrógeno sí se encuentra en la Naturaleza y es accesible a experimentos reales, mientras que la geometría de AdS/CFT no corres-

Geometría no conmutativa de Connes

SE PUEDE REPRODUCIR la geometría no conmutativa de Connes mediante un modelo intuitivo, que de hecho aparece en la derivación a partir de la teoría de *D*-branas. Consideremos una cuerda abierta rígida que se comporta como un dipolo eléctrico, con cargas opuestas en los extremos, y que se propaga como en la figura, inmersa en un campo magnético de magnitud $B = \hbar^2 c/2L_c^2$. Si el dipolo se mueve con impulso *P* en la dirección *X*, la fuerza magnética tiende a separar las cargas, equilibrando la atracción eléctrica. La longitud de equilibrio es $Y = 2L_c^2 P/\hbar$, de donde se deduce que las indeterminaciones respectivas satisfacen $\Delta Y = 2L_c^2 \Delta P/\hbar$. Combinando esta relación con la desigualdad ordinaria de Heisenberg, $\Delta X \Delta P \geq \hbar/2$, obtenemos la desigualdad de Connes: $\Delta X \Delta Y \geq \theta = L_c^2$. Por tanto, la geometría medida con experimentos que involucren sólo cuerdas abiertas rígidas es el plano no conmutativo de Connes. Para obtenerlo en la teoría BFSS basta encontrar una solución en la que las cuerdas abiertas sean efectivamente rígidas.



JOSE L. FERNANDEZ BARBON

ponde al mundo real, ni siquiera en un sentido aproximado.

Se puede decir que hay un progreso constante hacia la formulación de versiones menos simétricas de la dualidad AdS/CFT. Sin embargo, aún estamos lejos de encontrar una codificación "no conmutativa" de un espaciotiempo similar al observado experimentalmente, con sus cuatro dimensiones en expansión cosmológica y su espectro de partículas no supersimétrico, tal como lo describe el modelo estándar. El tiempo dirá si nuestras dificultades son puramente técnicas, o por el contrario serán necesarias ideas cualitativamente nuevas. Entretanto, la próxima generación de aceleradores de partículas, principalmente el colisionador de protones LHC del CERN, puede empezar a desentrañar algunos de los misterios sobre la estructura cuántica del espaciotiempo. Por ejemplo, el descubrimiento experimental de supersimetría aproximada representaría un gran avance en el asentamiento del paradigma aquí esbozado.

El autor

José Fernández Barbón trabaja como investigador de la división teórica del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) en Ginebra, y es profesor titular del departamento de Física de Partículas de la Universidad de Santiago de Compostela. Se doctoró en la Universidad Autónoma de Madrid en 1992 y ha trabajado como investigador asociado en las universidades de Princeton (EE.UU.) y Utrecht (Holanda). Su trabajo se ha centrado en el estudio de la teoría de cuerdas, principalmente en sus aplicaciones a la teoría cuántica de los agujeros negros.

Bibliografía complementaria

ELECTRONES, NEUTRINOS Y QUARKS. F. J. Ynduráin. Crítica, 2001.

PARTÍCULAS ELEMENTALES: EN BUSCA DE LAS ESTRUCTURAS MÁS PEQUEÑAS DEL UNIVERSO. G. 't Hooft. Crítica, 2001.

EL UNIVERSO ELEGANTE: SUPERCUERDAS, DIMENSIONES OCULTAS Y LA BÚSQUEDA DE UNA TEORÍA DEFINITIVA. B. Greene. Crítica, 2001.

EL UNIVERSO EN UNA CÁSCARA DE NUEZ. S. W. Hawking. Crítica, 2002.

El mito de la autoestima

Fomentar la autoestima no mejora el rendimiento académico ni desalienta la mala conducta

Roy F. Baumeister, Jennifer D. Campbell, Joachim I. Krueger y Kathleen D. Vohs

Existe la creencia de que la autoestima desempeña un papel fundamental en la salud psicológica. Ello explica nuestro interés en salvaguardarla y reforzarla. EE.UU. y otros países, sin embargo, van un poco más lejos: consideran la opinión favorable de uno mismo la principal fuente psicológica de toda clase de efectos beneficiosos. Este principio entraña un corolario: a saber, que en la falta de autoestima enraízan males y disfunciones individuales y, por tanto, sociales. Esa concepción ha fundamentado, durante decenios, un ambicioso programa de acción social, articulado a través de numerosas campañas que pretendían potenciar la autoestima de los ciudadanos.

Veamos lo ocurrido en California en la segunda mitad del decenio de los ochenta. Acicateado por John Vasconcellos, miembro de la cámara regional, el gobernador George Deukmejian creó una "fuerza especial", cuya misión era fomentar la autoestima y la responsabilidad, personal y social. Vasconcellos argüía que al reforzar la autoestima en los jóvenes, disminuirían la delincuencia, los embarazos en adolescentes, el consumo de drogas, el fracaso escolar y la contaminación ambiental. Pensaba incluso que su plan contribuiría en el futuro a equilibrar los presupuestos del estado, esperanza que fundaba en la observación de que las personas con mayor autoestima obtenían mayores ingresos y, en consecuencia, abonaban más impuestos. Entre otras acciones, la fuerza especial encargó a una comisión de expertos la revisión de la bibliografía al caso. Los resultados se publicaron en 1989 en *La importancia social de la autoestima*. Concluían que "un gran número, por no decir la mayor parte, de los problemas que plagan la sociedad hunden sus raíces en la escasa autoestima de una fracción notable de la población". Poco era, en realidad, lo que el informe contenía en respaldo de tal afirmación.

Aunque la fuerza especial californiana se disolvió en 1995, su empeño fue retomado por una organización sin ánimo de lucro, la Asociación Nacional para la Autoestima (NASE), que se proponía, según su declaración de principios, proporcionar clarividencia y potenciar la capacidad de liderazgo y autodefensa, con el fin de mejorar la condición humana mediante el refuerzo de la autoestima. Vasconcellos, hoy senador por el estado de California, forma parte del consejo asesor.

MELISSA SZALKOWSKI



Según el cristal...

Para calibrar el valor de la autoestima se requiere, ante todo, un instrumento que permita medirla. En su mayoría, los investigadores se limitan a preguntar a los sujetos qué piensan de sí mismos. Como es natural, las respuestas suelen venir salpimentadas por la tendencia común a ofrecer una imagen favorable de uno mismo. Mas, por desdicha, los psicólogos no disponen de ningún método mejor. La subjetividad de los autoinformes añade confusión a los resultados. Por ejemplo, cuando los individuos se califican a sí mismos en otros atributos, sus valoraciones resultan, a menudo, incoherentes. Veamos qué ocurre en el caso de la autoestima y el atractivo físico.

Numerosos estudios han explorado la correlación entre estos dos atributos. En general, se aprecian claros vínculos positivos cuando son los propios sujetos quienes se bareman en uno y otro. Podría ser que las personas con un físico atractivo gozaran de una elevada autoestima porque suelen ser mejor tratadas que las menos agraciadas: son más populares, su compañía es más deseada y son más apreciadas por sus amigos o amantes. Pero podría ocurrir también que quienes, declarando ser maravillosos, se asignan puntuaciones elevadas en las escalas de autoestima, en realidad se estén jactando de ser físicamente atractivos.

En 1995, Edward F. Diener y Brian Wolsic, de la Universidad de Illinois, y Frank Fujita, de la Universidad de Indiana en South Bend, examinaron esta posibilidad. Además de obtener las calificaciones de autoestima de una amplia muestra de población, tomaron fotografías de todos los participantes y las presentaron ante un jurado encargado de puntuar el atractivo físico. En las valoraciones basadas en fotografías de cuerpo entero no se apreció una correlación significativa entre las dos variables. Las fotografías de primer plano, en cambio, sí revelaron una ligera correlación entre autoestima y atractivo físico. Sin embargo, incluso este hallazgo podía considerarse dudoso, pues los individuos con elevado concepto de sí mismos podrían haberse esforzado en presentar un mejor aspecto, por ejemplo, ataviándose con joyas o vistiendo ropas atractivas. De hecho, cuando se mostraron a los jurados fotografías del rostro de los participantes sin adornar, la correlación se redujo a cero. En cambio, sí se observó una fuerte correlación entre el atractivo físico y la autoestima cuando las valoraciones eran emitidas por los participantes. Parece evidente, pues, que los individuos con elevada autoestima se tienen por hermosas criaturas, aunque no necesariamente sea así en opinión de los demás.

Tal discrepancia debería llamarnos la atención. Lo que a primera vista parecía una fuerte correlación entre la apariencia física y la autoestima resultó no ser más que un reflejo de la valoración favorable que el individuo tiene de sí mismo en distintos aspectos. Un fenómeno paralelo afecta a los sujetos con baja autoestima, proclives a la floquinaucinihilpilificación —pomposo vocablo ante el que no hemos podido resistirnos, que describe la tendencia a desdeñar o conceder nulo valor a las cosas. Es decir, las personas con baja autoestima no sólo se ven como nulidades, sino que se muestran además negativas respecto a todo.

Esta tendencia al pesimismo ha distorsionado algunos análisis. Los psicólogos consideraban antaño que las personas con baja autoestima tenían muchos prejuicios. Los primeros estudios, en los que los sujetos se limitaban a valorar grupos sociales a los que no pertenecían, parecían abonar dicha hipótesis. Pero expertos con mayor rigor, así Jennifer Crocker, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, la pusieron en tela de juicio. Después de todo, en el caso de personas que se valoran negativamente a sí mismas mal puede decirse que tienen prejuicios porque también valoren negativamente a quienes no son como ellas. Si se utiliza como medida del sesgo la diferencia entre las valoraciones que los sujetos dan a su propio grupo y las que otorgan a otros grupos, se observa justamente lo contrario: son aquellos con *elevada* autoestima los que cargan con mayores prejuicios. La floquinaucinihilpilificación acentúa también el riesgo de que quienes se describen peyorativamente a sí mismos puedan describir sus vidas de forma similar, dando así aliento a la apariencia de que la baja opinión de uno mismo sólo causa desgracia.

Dada la confusión que generan los autoinformes, decidimos centrarnos al máximo en las mediciones objetivas. Ello redujo de forma significativa el número de estudios revisables: desde más de 15.000 a unos 200. Procuramos eludir una falacia adicional: la presunción de que una correlación entre la autoestima y alguna forma de conducta deseable proviene de una relación causa-efecto. A decir verdad, el meollo del debate estriba precisamente en la existencia de una relación causal. Si una autoestima elevada generara beneficios directos, quedarían justificados los esfuerzos y dispendios dedicados a infundir tal sentimiento. Pero si la relación causal fuera inversa, es decir, si una imagen positiva de uno mismo fuera el resultado del éxito social o de una conducta moral ejemplar —lo cual resultaría, cuando menos, plausible—, de poco serviría fomentar sólo la autoestima. Para resolver esta cuestión, nos dispusimos a revisar estudios que relacionaban la autoestima con el rendimiento académico.

Resumen/Autoestima

- La sociedad estadounidense muestra especial preocupación por la falta de autoestima; ve en esa carencia la causa de muchas conductas reprobables.
- La baja autoestima no suele justificar —contrariamente a la creencia popular— la agresividad. Tampoco muestra correlación con la drogadicción ni con el alcoholismo.
- La potenciación de la autoestima no se traduce en un aumento del rendimiento escolar o laboral.
- Las personas con autoestima elevada muestran mayor habilidad para iniciar relaciones personales y parecen sentirse más felices que las demás.

Desconcierto en la escuela

En principio, todo hacía pensar que el refuerzo de la autoestima constituiría un poderoso instrumento de ayuda para los estudiantes. Parecía lógico pensar que una buena dosis de ufanía potenciaría el esfuerzo y la perseverancia de los alumnos, al tiempo que les haría menos susceptibles a sucumbir ante los efectos paralizantes del desánimo, el sentimiento de incompetencia o las dudas sobre su propia capacidad. Los primeros trabajos mostraron una correlación positiva entre autoestima y rendimiento escolar, lo que abonó esta hipótesis. Pero los estudios modernos, en cambio, han cuestionado la creencia de que una autoestima elevada induzca verdaderamente a los estudiantes a esforzarse más.

Para inferir relaciones causales entre sucesos, los sujetos deben examinarse en dos ocasiones separadas en el tiempo. Así se hizo en 1986: Sheila M. Pottebaum, Timothy Z. Keith y Stewart W. Ehly, de la Universidad de Iowa, examinaron a 23.000 alumnos de instituto cuando se encontraban, primero en el 10º nivel y luego en el 12º (equivalentes, en edad, a nuestro 3º de ESO y 1º de bachillerato). La autoestima en el 10º nivel resultó predecir débilmente el rendimiento escolar en el 12º. La correlación entre los resultados académicos del 10º nivel y la autoestima del 12º alcanzó valores ligeramente superiores. A tenor de estos datos, analizados hoy en múltiples estudios, no existen indicios de que el aumento de la autoestima ofrezca grandes ventajas a los alumnos. Algunos trabajos incluso sugieren que el estímulo forzado de la autoestima puede empeorar el rendimiento posterior.

Pero aunque reforzar la autoestima no mejore el rendimiento escolar, ¿no podría resultar útil más adelante, por ejemplo, en la vida laboral? Al parecer, no. Los estudios de posibles vínculos entre la opinión que los trabajadores tienen de sí mismos y su rendimiento son eco de lo observado en el contexto escolar. La simple búsqueda de correlaciones proporciona algunos resultados sugerentes, pero en ningún caso arrojan luz sobre si la autoestima constituye la causa del buen rendimiento laboral, o viceversa. (En cualquier caso, el vínculo no es particularmente fuerte.)

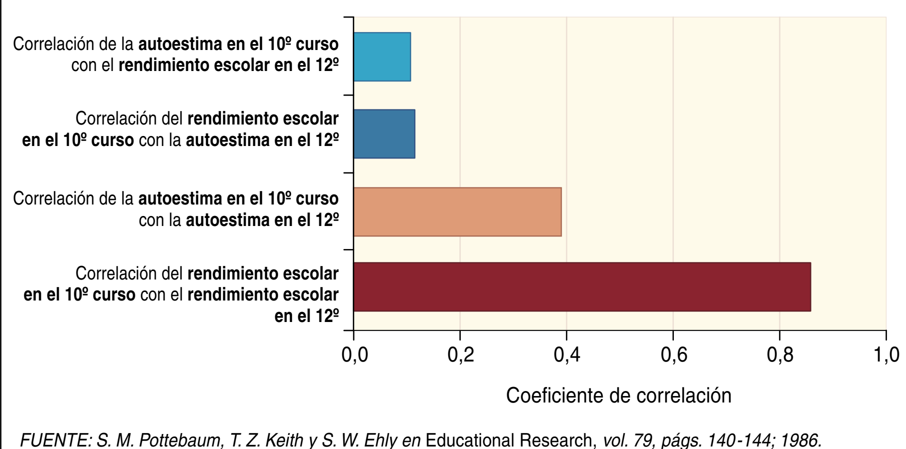
Si bien no contribuye a un mejor aprovechamiento en la escuela o mayor rendimiento en el trabajo, ¿sirve la autoestima para relacionarnos mejor con los demás? Las personas con una buena imagen de sí mismas suelen resultar más agradables; en general, preferimos relacionarnos con gente que muestra confianza en sí misma y adopta una actitud positiva. Rehuimos el trato de quienes se sienten inseguros y dudan de sí mismos.

Los sujetos que poseen una autoestima elevada suelen tenerse por personajes populares; consideran que la calidad de sus amistades es superior a las descritas por los individuos que se tienen en poco, los cuales informan de relaciones personales más conflictivas y menor apoyo social. Pero, como demostraron en 1995 Julia Bishop y Heidi M. Inderbitzen-Nolan, de la Universidad de Nebraska en Lincoln, tales afirmaciones no reflejan la realidad. Pidieron a 542 escolares de 9º curso que nombraran los compañeros por los que sentían mayor aprecio y los que les provocaban mayor antipatía; las ordenaciones resultantes no mostraron correlación alguna con la autoestima.

Lo mismo sucede en adultos. En una investigación realizada en las postrimerías de los ochenta, Duane P. Buhrmester, ahora en la Universidad de Texas en Dallas, observó, con tres colaboradores suyos, que los estudiantes universitarios con autoestima elevada declaraban mostrar una

AUTOESTIMA Y RENDIMIENTO ESCOLAR

En un intento de calibrar si una autoestima elevada se traduce en un buen rendimiento académico, se examinó a millares de alumnos estadounidenses de los cursos 10º y 12º (equivalentes, en edad, a nuestros 3º de ESO y 1º de bachillerato). La correlación entre la autoestima en el 10º curso y el rendimiento académico en el 12º resultó aproximadamente igual que la correlación entre las calificaciones obtenidas en el 10º curso y la autoestima en el 12º. Así pues, resulta difícil saber cuál es la causa y cuál el efecto, o si existe un tercer atributo que influye a la vez en la autoestima y en el rendimiento escolar.



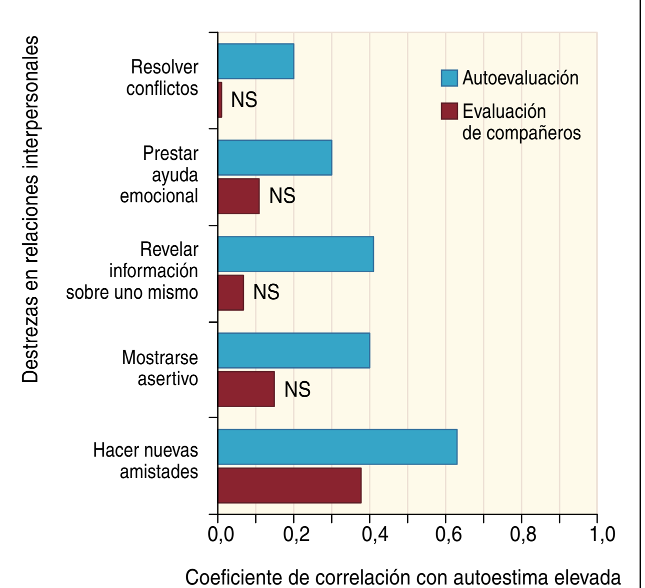
FUENTE: S. M. Pottebaum, T. Z. Keith y S. W. Ehly en Educational Research, *vol. 79, págs. 140-144; 1986.*



STONE+

AUTOESTIMA Y RELACIONES INTERPERSONALES





Un estudio con estudiantes universitarios reveló una fuerte vinculación entre la autoestima y diversas habilidades interpersonales cuando eran los propios sujetos quienes se valoraban a sí mismos. Al analizar las calificaciones emitidas por sus compañeros, sin embargo, se obtenía una imagen diferente: en cuatro de las cinco destrezas examinadas, la correlación con la autoestima cayó a niveles estadísticamente no significativos (NS). La conexión entre la autoestima y la facilidad para iniciar relaciones, en cambio, mostró mayor robustez.

FUENTE: D. Buhrmester, W. Furman, M. T. Wittenberg y H. T. Reis en Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 55, págs. 991-1008; 1988.*

RANDY FARIS *Corbis*

señalada facilidad para iniciar nuevas relaciones, una mayor disposición a hacer confidencias sobre sí mismos, a mostrarse asertivos, a prestar ayuda emocional a otros e incluso una mayor habilidad para afrontar conflictos interpersonales. Sin embargo, las valoraciones emitidas por sus compañeros pergeñaban un cuadro harto distinto. En cuatro de los cinco atributos examinados, la correlación con la autoestima cayó prácticamente a cero. La única que permaneció estadísticamente significativa fue la relativa a la capacidad de los sujetos para establecer nuevas amistades o relaciones sociales. Esta parece ser la esfera donde la confianza en uno mismo reviste mayor trascendencia: los sujetos que se reputan a sí mismos interesantes y atractivos seguramente inician sin especial traba conversaciones con desconocidos, mientras que los faltos de autoestima rehúyen dar comienzo a tales contactos, temiendo ser rechazados.

Cabría imaginar que tales diferencias influyesen también en la vida amorosa. En 2002, el grupo dirigido por Sandra L. Murray, de la Universidad de Buffalo, encontró que las personas con escasa autoestima tienden a desconfiar de las manifestaciones de amor o afecto de su pareja; temen continuamente el rechazo. Sin embargo, las investigaciones no han proporcionado pruebas de que tales relaciones sean especialmente propensas a disolverse. De hecho, es posible que una autoestima elevada suponga una mayor amenaza de ruptura. Así lo demostraron en 1987 Carril E. Rusbult, Gregory D. Morrow y Dennis J. Johnson, entonces en la Universidad de Kentucky; su estudio sugería que las personas con una elevada opinión de sí mismas tienden —en medida superior que el resto— a resolver las dificultades cercenando relaciones y buscando nuevas parejas.

¿Cómo influye la autoestima —o su falta— en la actividad sexual? Esta cuestión ha sido ampliamente estudiada. Los resultados sugieren que quienes poseen una autoestima elevada se muestran menos inhibidos y más dispuestos a desdeñar los riesgos al iniciar relaciones sexuales. Por otra parte, las experiencias sexuales negativas y los embarazos no deseados parecen menguar la autoestima.

Drogas y alcohol

¿Influye la estimación de uno mismo en el abuso del alcohol o las drogas? Numerosos psicólogos admitían esa ilación. Aducían que las personas con baja opinión de sí mismas buscan consuelo en esas sustancias. Según su teoría, bastaba con reforzar la autoestima del sujeto para evitar que éste cayera en el alcoholismo o la drogadicción. Sin embargo, los datos no muestran ninguna relación causal entre la baja autoestima y dicho consumo abusivo. En un estudio a gran escala realizado por Rob McGee y Sheila M. Williams, de la facultad de medicina de la Universidad neozelandesa de Otago, no se apreció correlación entre la autoestima medida entre las edades de 9 y 13 años y el alcoholismo o la drogadicción a la edad de 15. Incluso cuando los resultados dejan entrever vínculos, éstos resultan ambiguos y no concluyentes: mientras algunos estudios sugieren que la autoestima *elevada* está asociada con el alcoholismo, otro sugiere lo contrario.

En cuanto al uso ilícito de drogas, sí existen indicios de su relación causal con la baja autoestima. En concreto, Judy A. Andrews y Susan C. Duncan, del Instituto de Investigación de Oregón, señalaron en 1997 que el declive en los niveles de motivación para el estudio provocaba un descenso de la autoestima, lo cual, a su vez, llevaba al consumo de ma-

rihuana; se trataba, sin embargo, de un nexo bastante débil.

Si la interpretación de estos datos entraña mayor dificultad es quizá por la diversidad de motivaciones que pueden inducir al consumo de alcohol y drogas: mientras algunas personas buscan emoción, otras intentan sobrellevar o huir de la infelicidad crónica. Tal complejidad impide formular enunciados categóricos. Otro tanto vale para el abuso del tabaco: en su mayoría, las investigaciones concluyen que no existe ninguna relación entre éste y la autoestima.

Para añadir complicación a la revisión que aquí nos ocupa, los estudios no suelen presentar una definición precisa del concepto de autoestima. Ello hace que en la misma categoría de análisis se mezclen personas con un sano respeto hacia sí mismas con aquellas que fingen tener una autoestima mayor de la que realmente sienten o incluso con quienes muestran un perfil narcisista. No es extraño, pues, que este campo de investigación sólo ofrezca conclusiones débiles o contradictorias.

Gallitos de corral

Desde hace decenios, los psicólogos han venido creyendo que una baja autoestima causaba un comportamiento agresivo. En 1996, uno de los autores (Baumeister) puso en tela de juicio tal hipótesis. Tras revisar una serie de estudios, llegó a la conclusión de que los perpetradores de agresiones suelen mantener, por lo general, una opinión favorable, incluso exageradamente buena, de sí mismos.

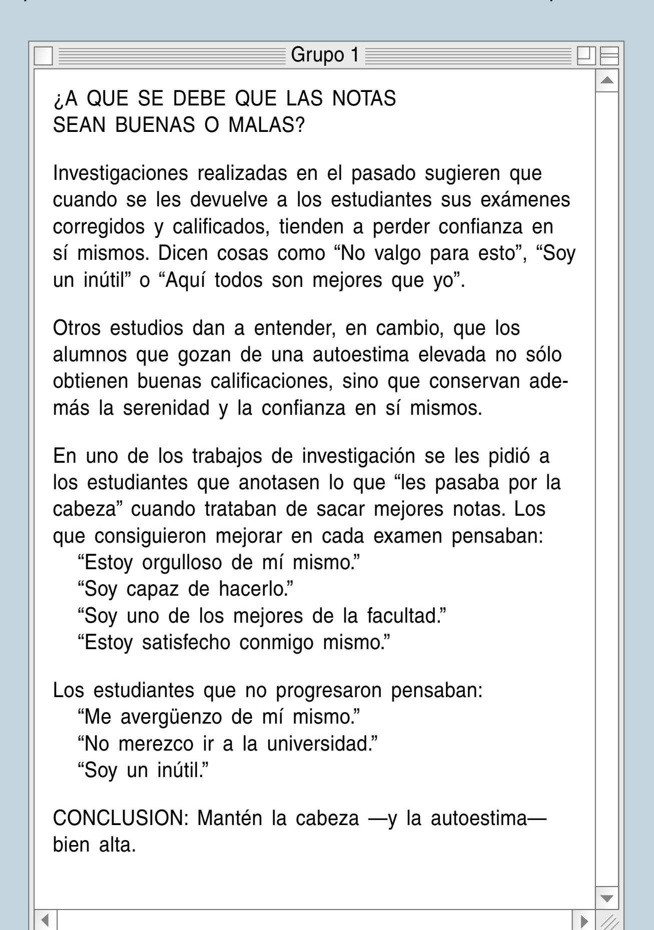
Fijémonos en las intimidaciones que se producen entre los niños, una

AUTOESTIMA Y RESPONSABILIDAD

Un estudio realizado en 1999 por Donelson R. Forsyth y Natalie A. Kerr, de la Universidad Commonwealth de Virginia, induce a pensar que los programas para aumentar la autoestima en los alumnos rezagados pueden tener efectos contraproducentes. (Los sujetos de estudio eran estudiantes universitarios de psicología.)

Quienes recibían calificaciones de D a F (equivalentes a “suficiente” y “muy deficiente”) se dividieron en dos grupos, organizados para que tuvieran, inicialmente, la misma puntuación media. Cada semana, los estudiantes del primer grupo recibían un correo electrónico que pretendía reforzar su autoestima (*como en el ejemplo de la izquierda*). Los del segundo grupo recibían un mensaje que fomentaba la responsabilidad personal ante el rendimiento académico (*derecha*).

Al final del curso, el promedio de las calificaciones de los alumnos del primer grupo cayó por debajo del 50 por ciento, es decir, suspendieron. Los estudiantes del segundo grupo, en cambio, obtuvieron un promedio del 62 por ciento (un “suficiente bajo”); no gran cosa, pero, al fin y al cabo, aprobado.


Grupo 1

¿A QUE SE DEBE QUE LAS NOTAS SEAN BUENAS O MALAS?

Investigaciones realizadas en el pasado sugieren que cuando se les devuelve a los estudiantes sus exámenes corregidos y calificados, tienden a perder confianza en sí mismos. Dicen cosas como “No valgo para esto”, “Soy un inútil” o “Aquí todos son mejores que yo”.

Otros estudios dan a entender, en cambio, que los alumnos que gozan de una autoestima elevada no sólo obtienen buenas calificaciones, sino que conservan además la serenidad y la confianza en sí mismos.

En uno de los trabajos de investigación se les pidió a los estudiantes que anotasen lo que “les pasaba por la cabeza” cuando trataban de sacar mejores notas. Los que consiguieron mejorar en cada examen pensaban:
“Estoy orgulloso de mí mismo.”
“Soy capaz de hacerlo.”
“Soy uno de los mejores de la facultad.”
“Estoy satisfecho conmigo mismo.”

Los estudiantes que no progresaron pensaban:
“Me avergüenzo de mí mismo.”
“No merezco ir a la universidad.”
“Soy un inútil.”

CONCLUSION: Mantén la cabeza —y la autoestima— bien alta.

Grupo 2

¿A QUE SE DEBE QUE LAS NOTAS SEAN BUENAS O MALAS?

Investigaciones realizadas en el pasado sugieren que, cuando se les devuelve a los estudiantes sus exámenes corregidos y calificados, tienden a echar la culpa de sus malas notas a factores externos. Dicen cosas como “El examen era demasiado difícil”, “No lo habíamos dado en clase” o “Las preguntas eran muy rebuscadas”.

Otros estudios dan a entender, en cambio, que los alumnos que se preocupan y responsabilizan de sus calificaciones no sólo obtienen mejores notas, sino que también aprenden que ellos, personalmente, controlan su rendimiento escolar.

En uno de los estudios se les pidió que anotasen lo que “les pasaba por la cabeza” cuando trataban de sacar mejores notas. Los que consiguieron mejorar en cada examen pensaban:
“Necesito esforzarme más.”
“Si me concentro, me aprenderé la lección.”
“Puedo controlar lo que me ocurre en clase.”
“Sé que puedo hacerlo.”

Los estudiantes que no progresaron pensaban:
“No es mi culpa.”
“Este examen era demasiado difícil.”
“No valgo para esto.”

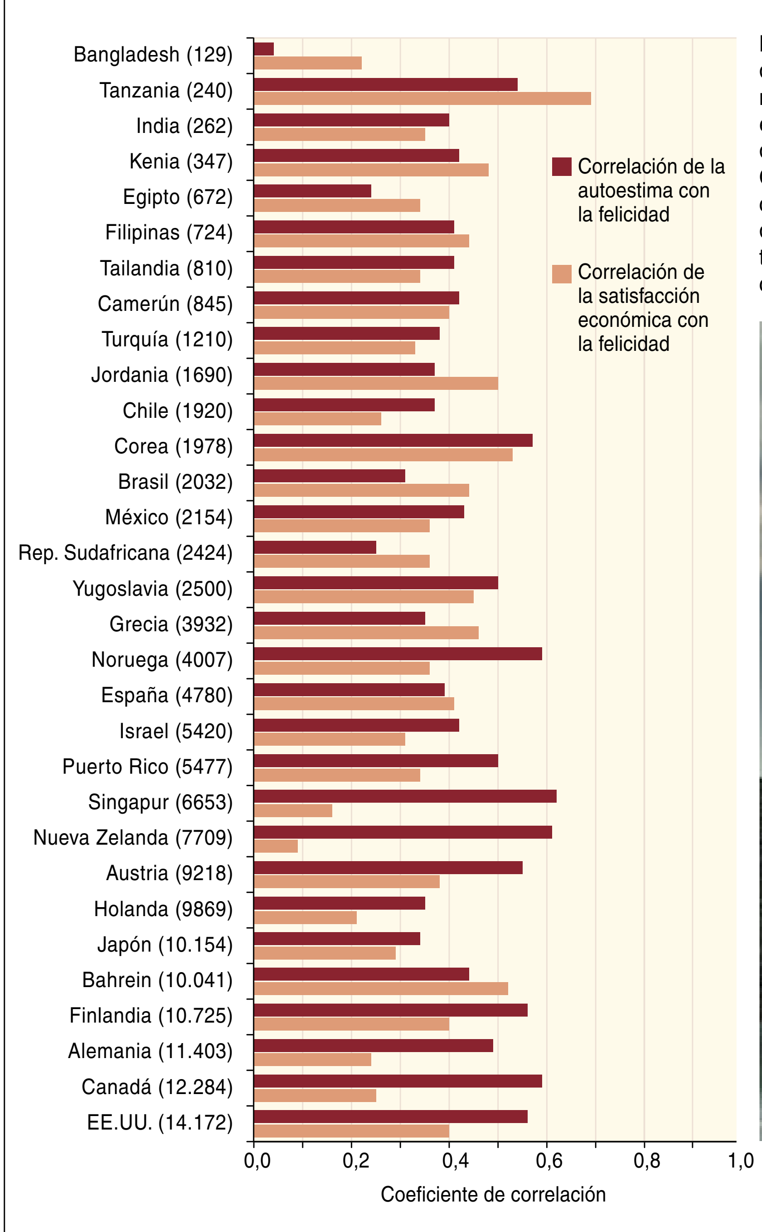
CONCLUSION: Toma las riendas de tu vida

forma corriente de agresión. Dan Olweus, de la Universidad de Bergen, puso ya en entredicho la idea de que bajo su dura piel, el niño "abusón" esconde una gran inseguridad. Aunque Olweus no midió directamente la autoestima, sí mostró que los agresores declaraban sufrir menos ansiedad y evidenciaban mayor seguridad en sí mismos que otros niños. Al parecer, lo mismo sirve para los adultos violentos, tal y como hace algunos años expuso Baumeister en estas mismas páginas.

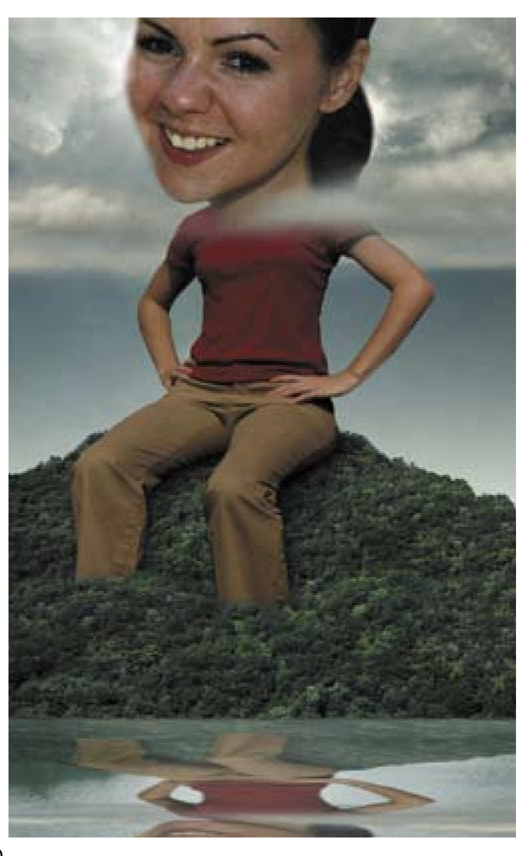
Tras llegar a la conclusión de que una autoestima elevada no mengua la tendencia hacia la violencia, no frena a los adolescentes en la senda hacia el alcoholismo, el abuso del tabaco o las drogas, ni mejora el rendimiento escolar o laboral, nos llevamos una agradable sorpresa cuando examinamos la posible relación entre la autoestima y la felicidad: las personas con un buen nivel de autoestima son más felices que las demás y tienen menos probabilidad de caer en depresiones.

En 1995 apareció un estudio de una solidez incuestionable. Diener y su hija Marissa, hoy en la Universidad de Utah, encuestaron a más de 13.000 estudiantes de los últimos cursos de instituto. A tenor de los resultados, la autoestima constituía el factor más determinante para sentirse satisfecho con la vida. Sonja Lyubomirsky, Chris Tkach y M. Robin DiMatteo, de la Universidad de California en Riverside, aportaron datos correspondientes a más de 600 adultos de edades comprendidas entre

AUTOESTIMA Y FELICIDAD



La satisfacción con la vida en general, o felicidad, que experimentan las personas parece ir de la mano con el nivel de autoestima. Que así ocurre en todo el mundo lo pone de manifiesto el grado de correlación que existe entre ambos atributos. Obsérvese que, en la mayoría de los países, la felicidad conserva mayor correlación con la autoestima que con la satisfacción económica. Las excepciones tienden a darse en los países con menor renta per cápita (*valores entre paréntesis*).



FUENTE: E. Diener y M. Diener en Journal of Personality and Social Pathology, *vol. 68, págs. 653-663; 1995.*

MELISSA SZALKOWSKI

51 y 95 años. Una vez más, la felicidad y la autoestima iban de la mano. Con todo, antes que podamos afirmar con certeza que el aprecio por uno mismo conduce a la felicidad, es necesario acometer una investigación más completa, que aborde las limitaciones de los estudios efectuados hasta la fecha.

En primer lugar, debe comprobarse que existe una relación causal. Parece verosímil que una elevada autoestima traiga consigo la felicidad, pero ningún estudio lo ha demostrado. Por ahora, la fuerte correlación entre autoestima y felicidad no es más que eso: una correlación. Entra dentro de lo plausible que el éxito profesional, académico o interpersonal comporte felicidad y autoestima y, a la inversa, que el fracaso correspondiente genere infelicidad y pérdida de autoestima. E incluso cabe que la felicidad —en cuanto tendencia o disposición a sentirse bien— realce la autoestima.

En segundo lugar, no podemos olvidar que la felicidad (así como su contraria, la depresión) se ha estudiado, sobre todo, mediante autoinformes. Además, la tendencia de algunas personas hacia el pesimismo o la negatividad puede generar bajas opiniones sobre sí mismos y juicios desfavorables de otros aspectos de la vida. No es la primera vez que cuestionamos el valor de los autoinformes, pero, ¿qué instrumento podría reemplazarlos? ¿Cómo demostrar, de forma convincente, que una persona es más (o menos) feliz de lo que ella cree? Está claro que va a resultar difícil, por no decir imposible, obtener medidas objetivas de la felicidad o la depresión, mas no por ello podemos aceptar los autoinformes sin crítica.

¿Qué podemos, pues, concluir? ¿Deben los padres, los maestros y los terapeutas tratar de reforzar la autoestima? En el curso de nuestra revisión bibliográfica, hallamos indicios de la utilidad de la autoestima: aumenta la perseverancia para afrontar un fracaso y favorece las relaciones interpersonales. Además, la baja autoestima constituye un factor de riesgo respecto a ciertos trastornos alimentarios, en especial la bulimia —así lo documentaron uno de los autores (Vohs) y sus colaboradores en 1999. Pese a la dificultad de demostrar ciertos efectos de la autoestima mediante pruebas objetivas, nos inclinamos a aceptar los indicios (subjetivos) de que la autoestima camina de la mano con la felicidad.

Admitimos, pues, que una inyección de autoestima podría resultar beneficiosa para el individuo. Pero, ¿qué ocurriría si un exaltado sentimiento de la propia valía llevase a alguien a exigir un tratamiento preferente o a explotar a sus prójimos? Los costos sociales serían, sin duda, considerables. Además, escasean los indicios de que la potenciación gratuita de la autoestima en niños o adultos —basada en el mero hecho de ser ellos mismos— ofrece beneficios a la sociedad, más allá de la satisfacción que aporta participar en semejante ejercicio de autocomplacencia.

Los autores

Roy F. Baumeister ocupa desde 2003 la cátedra Eppes de psicología en la Universidad de Florida. **Jennifer D. Campbell** imparte clases de psicología en la Universidad de Columbia Británica en Vancouver. **Joachim I. Krueger** es profesor de psicología en la Universidad Brown. **Kathleen D. Vohs** es titular de la cátedra canadiense de investigación en mercadotecnia y psicología del consumidor en la Escuela de Negocios Sauder de la Universidad de Columbia Británica.

Bibliografía complementaria

THE SOCIAL IMPORTANCE OF SELF-ESTEEM. Dirigido por Andrew M. Mecca, Neil J. Smelser y John Vasconcellos. University of California Press, 1989.

RAÍCES DE LA VIOLENCIA. Roy F. Baumeister en *Investigación y Ciencia*, junio, 2001.

DOES HIGH SELF-ESTEEM CAUSE BETTER PERFORMANCE, INTERPERSONAL SUCCESS, HAPPINESS, OR HEALTHIER LIFESTYLES? Roy F. Baumeister, Jennifer D. Campbell, Joachim I. Krueger y Kathleen D. Vohs en *Psychological Science in the Public Interest*, vol. 4, n.º 1, págs. 1-44; mayo, 2003.

La ceca de Iulia Traducta

En tiempos de Octavio Augusto, la moneda constituyó un vehículo de extraordinaria fuerza propagandística al servicio del poder. Lo comprobamos en la ceca de la ciudad romana de Algeciras

Salvador Bravo Jiménez

Cuando se escribe sobre monedas del mundo antiguo, trátese de colecciones privadas o públicas, siempre queda la duda sobre su proveniencia, salvo que éstas vengan de una excavación arqueológica. En ese fenómeno ha tenido mucho que ver el afán del hombre por el coleccionismo. Aficionados famosos fueron el cardenal Pietro Barbo y Cosme el Viejo, en el Renacimiento.



1. REVERSO DE UN AS DE IULIA TRADUCTA acuñado en Algeciras (Cádiz), donde, enmarcando el nombre de la ciudad, aparece la corona cívica.

El punto de inflexión sobre los estudios numismáticos se fecha con la publicación, en 1515, del libro *De asse et partibus eius* (Del as y sus partes), de Guillermo Budé, y, dos años más tarde, *Illustrium Imagines* (Imágenes de hombres ilustres), de Andrea Fulvio. Se proponen ambos divulgar los conocimientos numismáticos a través de las imágenes de las piezas; prima el sentido iconográfico sobre el metrológico. Desde esa perspectiva abordamos este estudio.

Las primeras monedas aparecieron en Lidia, en el siglo VII a.C. Estaban acuñadas en una aleación de oro y plata (*electrón*). Desde esa región del Asia Menor, su uso se propagó por la Hélade. Entendida la acuñación como un símbolo de independencia, las ciudades estado comienzan a emitir moneda de plata con pesos similares para sus colonias. Cada ciudad adoptará un emblema propio, que figurará en sus decoraciones: la lechuza en Atenas, la tortuga en Egina o el caballo alado en Corinto. Hasta la época de Alejandro Magno el retrato de un personaje no ocupa el anverso de las monedas. En torno al siglo IV a.C. también se acuñan en Roma lingotes rectangulares de bronce que portan una marca: *aes signatum*, con un peso de un kilo y medio aproximadamente.

MUSEO MUNICIPAL DE ALGECIRAS

Con la influencia de las colonias griegas del sur de la península itálica e islas adyacentes, el *aes* se irá sustituyendo por las amonedaciones romano-campanas hasta la creación el año 269 a.C. del denario de plata, si nos fiamos de Plinio el Viejo, o el 212 a.C., de acuerdo con la investigación reciente. Con la instauración del denario, Roma inaugura la sistematización del numerario monetal. En adelante, el uso de la moneda se generalizará hasta convertirse en elemento indispensable de la economía, la sociedad y política romanas.

LA REFORMA AUGUSTEA

METAL	TIPO	VALOR	PESO	EQUIVALENCIA
ORO	AUREO	1	7,80	1/42 de LIBRA (327 g)
	QUINARIO	1/2	3,89	
PLATA	DENARIO	1	3,90	1/48 de LIBRA
	QUINARIO	1/2	1,95	1/168 de LIBRA
BRONCE	SESTERCIO	4 ASES	27	1 UNCIA
	DUPONDIO	2 ASES	13,65	1/2 de UNCIA
	AS	1	10,90	1/4 de UNCIA
	CUADRANTE	1/4 de AS	3,24	

Augusto y su régimen

En la sesión senatorial de 13 de enero del año 27 a.C. Octavio recibe el título de *Augustus* tras proclamar concluida su labor con el castigo de los asesinos de su padre adoptivo Cayo Julio César. Ante la insistencia del Senado, consiente en administrar algunas provincias. El compromiso dura poco, pues en 23 a.C. Octavio renuncia al consulado, aunque se hace conceder los honores de potestad tribunicia (*tribunicia potestas*) y procónsul mayor (*imperium proconsulare maius*).

La arqueología ha rescatado la iconografía asociada a su rango. Se observa una paulatina sustitución de su nombre por el de emperador Augusto (*Imperator Caesar Augustus*) con mención de sus títulos personales, tales como la *tribunicia potestas* y *pontifex maximus*. Aunque ninguno de esos honores, por separado, es ajeno a la constitución tardorrepublicana, constituye una llamativa singularidad la reunión de tales poderes en una misma persona.

Imperator, aquel que mandaba (en latín, *qui imperabat*), se aplicaba al general de un ejército. Conservaba el título cuando volvía a la vida privada. Aunque ni *tribunicia potestas*, ni *imperium proconsulare* eran, en sentido estricto, magistraturas republicanas, la primera conllevaba el derecho al veto de Augusto contra cualquier acto de un magistrado; en virtud de la segunda, se poseía el control absoluto sobre la ciudad de Roma, por encima de cualquier gobernador provincial.

Pero si algún término define el nuevo carácter de Augusto es el de *Princeps*, el primero entre los ciudadanos, tutor de las instituciones republicanas. Parece que se llegó a una suerte de acuerdo entre lo que era, a todas luces, una dualidad de sistemas políticos: por un lado, el Senado, con sus magistraturas republicanas y, por otro, el Príncipe y sus funcionarios; por un lado, la administración provincial senatorial y, por otro, las provincias asignadas al Príncipe; por un lado, el erario público (*Aerarium Publicum*) y, por otro, la hacienda imperial (*Fiscus*); por un lado, el derecho republicano y, por otro, las decisiones emanadas del Príncipe. Se trata, a la postre, de una unión de dos conceptos clásicos del mundo antiguo: la ciudad (*civitas*) y el reino (*regnum*). Para hacerlo visible, se requiere un programa propagandístico, iconográfico, de enormes proporciones. Nada mejor que la moneda para vehicularlo.

La amonedación augustea

Pocos años después de recibir el título de augusto, Octavio comienza su gran reforma monetaria. Divide el control de la moneda entre el Senado, al que le corresponde la amonedación en bronce, que porta en



SALVADOR BRAVO JIMENEZ

2. EL ESTRECHO DE GIBRALTAR según Cayo Plinio Segundo (hacia 73).

1.ª SERIE

TIPO	VALOR	PESO
DUPONDIO	2 ASES	entre 13 y 14 gramos
AS	1 AS	entre 10 y 11 gramos
SEMIS	1/2 de AS	entre 5 y 6 gramos
CUADRANTE	1/4 de AS	entre 3 y 4 gramos

2.ª SERIE

TIPO	VALOR	PESO
DUPONDIO	2 ASES	entre 15 y 16 gramos
AS	1 AS	entre 9 y 10 gramos
SEMIS	1/2 de AS	entre 4 y 5 gramos
CUADRANTE	1/4 de AS	entre 2,5 y 3 gramos

3. LAS DOS SERIES DE AMONEDACIONES DE LA CECA. La 1.ª hace referencia al patrón semiuncial con ases cercanos a los 11 gramos. La 2.ª a la reforma augustea con ases de 9 gramos de media.

sus reversos las letras *SC (Senatus Consulto* o por decreto del Senado), y él mismo, quien se reserva la amonedación en oro y plata. Por lo que respecta a la moneda de bronce, la de mayor numerario y más accesible al pueblo, llevará la efigie del *Princeps*, sobre todo los sestercios, dupondios y ases.

Para imponer esa vía de autopromoción se apoyó en el poder emanado de la potestad tribunicia recibida el año 23 a.C. (En la amonedación broncínea del año 4 a.C. desapareció definitivamente el nombre de los magistrados monetales, quizás en homenaje prestado por el Príncipe al Senado, para afianzar la continuidad tardorrepublicana.)

En el marco de esa obsesión por dar a conocer el programa político augusteo se introducirá una constelación de dioses protectores del Príncipe: tras Apolo, el principal, Júpiter, Neptuno, Venus y Marte vengador. A ellos se les sumarán las alegorías de la Paz y de la Victoria. Son los anversos de los denarios de plata utilizados para pagar a sus ejércitos en Actium (31 a.C.) los elegidos portadores de estas efigies divinas.

Las imágenes transmiten el afán por la conquista de la paz. Jamás Roma había conocido monedas tan bellas, claras y simples. Se pueden incluso obviar las inscripciones, a excepción del nombre del Príncipe. Las diosas suelen llevar el cuerno de la abundancia y los laureles. El laurel, cuyas ramas servían de homenaje a los vencedores, era el árbol del dios Apolo y, como tal, ornamentaba los dinteles de entrada de la casa de los personajes principales.

En gratitud de los ciudadanos por la salvación de la República, Octavio introduce en sus monedas la "corona cívica". Este elemento militar rodea la leyenda *Ob Cives Servatos* (por la salvación de los ciudadanos). El historiador P. Zanker vincula ese símbolo a los homenajes del año 2 a.C.; poco a poco se convertirá en símbolo del poder romano. Son estos los elementos que aparecerán en las acuñaciones de Iulia Traducta.

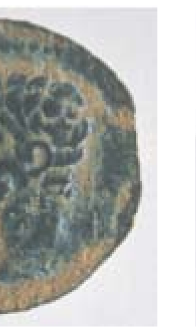
La ciudad de Iulia Traducta y su ceca

"*Viene a continuación Menlaria, con industria de salazón, y tras ella la ciudad y el río de Belón. Habitualmente se embarca aquí para pasar a Tingi, de la Maurousía, y tiene también mercado y salazones. Tingi tuvo antes por vecina a Zelis; mas los romanos trasladaron esta ciudad a la orilla opuesta, con parte de la población de Tingi; enviaron aún una colonia de ciudadanos romanos, y llamaron a la ciudad Iulia Ioza.*"

Este texto del capítulo primero del libro tercero de la *Geografía* de Estrabón, escrito en torno al año 6 a.C., evoca la génesis de la ciudad de Traducta, fundada muy probablemente por Marco Vipsanio Agripa hacia el año 29 o 28 a.C. en la bahía de Algeciras. (Este Agripa era lugarteniente de Octavio.) El texto subraya la procedencia de los habitantes: púnicos trasladados desde el norte de Africa y soldados veteranos.

Conocemos más testimonios sobre el origen de la ciudad. En torno al año 42 de nuestra era, Pomponio Mela, natural de Tingentera, señala en su *Chrorographia*: "*Y más adelante hay un golfo y en él está Carteia, que algunos creen que en otro tiempo fue Tartessos, y [también está] la que habitan fenicios trasladados desde Africa y de donde además somos nosotros: Tingentera.*"

Por tratarse de su patria chica, el testimonio de Mela adquiere suma importancia. Corrobora el texto de Estrabón y ubica la ciudad en la misma bahía, junto a Carteia. Sin embargo, el nombre oficial de la ciudad no lo encontraremos (a excepción de la epigrafía monetal) hasta 30 años más tarde en la *Historia natural* de Plinio: *"Más allá de las Columnas de Hércules estuvieron los oppida de Lissa y Cottae; hoy está Tingi, antigua fundación de Anteo, llamada luego Traducta Iulia por el césar Claudio, cuando la convirtió en colonia; se halla a 30.000 pasos de Baelo, el oppidum más próximo de la Bética. A 25.000 pasos de Tingi, en la costa oceánica, está la colonia augustea de Iulia Constantia Zulil,*





4. AS DE IULIA TRADUCTA. Anverso: cabeza de Augusto a izquierda con leyenda PERM. CAES. AVG. Reverso. corona cívica con leyenda IVLIA. TRAD.

SALVADOR BRAVO JIMENEZ (*arriba*); MUSEO MUNICIPAL DE ALGECIRAS (*abajo*)

que fue sustraída a la jurisdicción de los reyes y atribuida a la de la Bética. A 35.000 pasos de ésta se halla Lixus, convertida en colonia por el césar Claudio."

Según el enciclopedista, la ciudad se llama Iulia Traducta y, aunque es patente el error al ubicarla en la costa norteafricana, recoge acertadamente la tradición fundacional de la ciudad. Como acabamos de decir a propósito de Mela, nos hallamos ante una ciudad de nueva creación con dos elementos poblacionales: por un lado, veteranos de los ejércitos augusteos vencedores con estatuto de ciudadanía romana, a los que respondería el epíteto Iulia de la ciudad; y por otro, poblaciones de púnicos trasladados desde el norte de Africa, posiblemente con estatuto de ciudadanos romanos (al menos los de Tingi), que responderían al otro nombre de la ciudad, Traducta.

Así, la génesis de la ciudad se conforma mediante una verdadera *deductio*, una fundación cuyos parámetros deben observarse con precisión. Todo parece indicar que la ciudad se funda sobre una plataforma elevada en la desembocadura del río de la Miel, en el núcleo sur de Algeciras. Aunque se ha excavado parte del solar, hasta la fecha sólo se han encontrado los restos de un complejo industrial de salazones. Se supone, con fundamento, que la ciudad de Traducta yace bajo el subsuelo de esta zona de Algeciras.

La ciudad debió de proveerse de los elementos inherentes a un centro augusteo: una muralla, un foro y un espacio lúdico. Además, en razón de su situación periférica, el Príncipe le dota de la posibilidad de acuñar moneda mediante la instauración de una ceca imperial. Esta refleja la situación política, si bien la amonedación no verá truncada una tradición que arranca de los tipos púnicos de las monedas acuñadas en bronce.

Reversos y anversos

Los tipos que caracterizan sus monedas se basan en racimos de uvas, espigas tendidas y atunes de clara simbología púnica y amplia tradición en la zona del mediodía hispano y norte de Africa. Junto a ellos, aparecen los símbolos pontificales y definitorios de la sacralidad de Augusto —el Aspergilo, el Símpulo, el Praefericulo, el Apex o la Pátera— y civiles —corona cívica enmarcando el nombre de la ciudad—, elementos culturales inherentes a la devoción que la ciudad profesa al Príncipe. Aparecen sobre los reversos.

Los anversos vienen ocupados por bustos del Príncipe o de sus herederos y nietos Cayo y Lucio. Caracterizan a los anversos dos tipos de leyendas muy representativas de la época: los bustos de Augusto se acompañan de la leyenda *PERM. CAES. AVG.* y los de Cayo y Lucio con las leyendas *C. CAESAR*, *C. L. CAES.* o bien *L. CAES.*

En lo que respecta a los valores, suele dividirse la emisión en dos grupos, el primero más cercano al patrón semiuncial con ases cercanos a los 11 gramos, y el segundo correspondiente a los valores de la reforma monetal llevada a cabo por Octavio (ases de 9,5 gramos). Ambas constan de dupondios, ases, semises y cuadrantes, acuñados todos en bronce.

Desde la concesión del título de *Pontifex Maximus*, tras la muerte de Lépido, se produce una inunda-

VALOR	ANVERSO	REVERSO	LEYENDA ANVERSO	LEYENDA REVERSO	METAL
DUPONDIO	Cabeza de Augusto a la izquierda	Cabezas de Cayo y Lucio	PERM. CAES. AVG.	M. L. CAES. IVL. TRAD.	BRONCE
DUPONDIO	Cabeza de Augusto a la izquierda	Cabezas de Cayo y Lucio	PERM. CAES. AVG.	C. L. CAES. IVL. TRAD.	BRONCE
AS	Cabeza de Augusto a la izquierda	Corona Cívica	PERM. CAES. AVG.	IVLIA. TRAD.	BRONCE
AS	Cabeza de Augusto a la izquierda	Corona Cívica	CAES. AVG. PER.	IVLIA. TRAD.	BRONCE
AS	Cabeza de Augusto a la izquierda	Corona Cívica	CAES. AVG. PER.	IVLIA. TRAD.	BRONCE
SEMIS	Cabeza de Augusto a la izquierda	Apex y Símpulo	PERM. CAES. AVG.	IVLIA. TRAD.	BRONCE
SEMIS	Cabeza de Cayo	Espiga a la izquierda	PERM. CAES. AVG.	IVL. TRAD.	BRONCE
SEMIS	Cabeza de Lucio	Espiga a la izquierda	L. CAES.	IVL. TRA.	BRONCE
SEMIS	Cabeza de Lucio	Racimo tendido	L. CAES.	IVL. TRAD.	BRONCE
CUADRANTE	Símpulo	Atún	CAES. AVG.	IVL. TRAD.	BRONCE
CUADRANTE	Cabeza de Augusto	Pátera, Aspergilo, Lítuo y Prefericulo	PER. CAE. AVG.	IVLIA. TRAD.	BRONCE

5. DESCRIPCION de los elementos iconográficos según los valores acuñados.

SALVADOR BRAVO JIMENEZ



6. MONEDAS DE LA CECA de Iulia Traducta según J. Sáez y J. Blanco. *Las monedas de la Bética Romana*, vol. I. Conventus Gaditanus. San Fernando, págs. 305-312; 1996.

ción de nuevos tipos iconográficos que conciernen a los instrumentos rituales de ceremonias augurales y pontificales. Se inician por entonces las primeras amonedaciones de Traducta, con unos caracteres bastante definidos para sus emisiones.

La ceca de Iulia Traducta se ve inmersa en los acontecimientos que elevan al poder a Octavio. Es más, el propio origen de la ciudad se debe al *Princeps*. Desde el año 27 a.C. se registra un considerable aumento del numerario de bronce en *Hispania* destinado al pago del ejército y coincidente con el inicio de las guerras cántabras. Los asentamientos de *Colonia Patricia* (Córdoba), *Caesaraugusta* (Zaragoza) o *Emerita Augusta* (Mérida) reclaman del Estado una cuantiosa financiación.

Al parecer, llegan de Roma a la Bética nuevos abridores de cuños, importando los tipos que se llevan a cabo en la Urbe en ese momento. Por ejemplo, la corona cívica de los reversos, puesta de moda en Roma sobre el año 23 a.C., fecha en la que Augusto, una vez recibida la potestad tribunicia, reabre la ceca de la capital del mundo. Además, los anversos presentan el busto de Augusto de manera muy particular, conocido como tipo *Actium* que se repetirá hasta la saciedad en todas las cecas y valores emitidos. A diferencia de otras ciudades de su entorno, Traducta no acuña sestercios. Tal vez el objetivo de esta primera acuñación no fuese tanto la soldada, cuanto conmemorar la propia fundación de la ciudad.

Moneda y poder

Los valores más altos (dupondio y as) se caracterizan por la uniformidad de sus anversos. Muestran la cabeza del *Princeps* a la izquierda, asemejándose mucho al tipo *Actium*, cuyos cabellos aparecen caídos hacia abajo en mechones sueltos. Es un tipo muy repetido en numerosas cecas hispanorromanas y representa una imagen de Augusto humanizado, cercano a los hombres receptores de la amonedación, el padre de todos los romanos, el *Pater Patriae*. Es un tipo que simboliza el primer ciudadano (*Princeps*) y persona sagrada a la vez (*Augusto*).

Rodeando al busto aparece la leyenda *PERM(issv) CAES(aris) AVG(vsti)*. Con ello se explicita la división de competencias relativas a la acuñación de moneda llevada a cabo entre el propio Augusto y el Senado, órgano al q ue le corresponde la amonedación en bronce. Si a esto unimos que la provincia Bética la administraba el Senado, está clara la intención de Octavio, ya Augusto, de controlar hasta el más mínimo detalle de la vida pública de su naciente imperio.

En las monedas aparece la aprobación o permiso del propio *Princeps* para la amonedación de la pieza. Así, aunque nominalmente toda la provincia Bética quedaba administrada por el Senado, ésta en general y la ciudad en particular, aparecen bajo la órbita de Augusto. Existen numerosas variantes de la leyenda, que afectan a la ubicación de las primeras palabras, *PERM*. o *AVG*. delante o detrás del busto imperial.

Para interpretar estas emisiones, conviene tener en cuenta que la imagen de Augusto reserva su aparición a los valores más altos de la ceca (dupondios y ases), reafirmando su autoridad con la inscripción que confiere valor legal a la moneda. Los reversos presentan mayores diferencias. Se aprecian dos tipos fundamentales: anverso con las efigies de Cayo y Lucio (dupondios) y reverso con la corona cívica que marca el nombre de la ciudad (ases).

Lucio y Cayo

El año 17 a.C., Augusto adopta y nombra herederos a los hijos de su yerno Marco Vipsanio Agripa y su hija Julia. Recomienda al Senado que les conceda el título de Príncipes de la Juventud (*Princeps Iuventutis*). Sin embargo, las trágicas y prematuras desapariciones de ambos frustran

SALVADOR BRAVO JIMENEZ

sus proyectos. Lucio muere el año 2 en Marsella cuando se dirigía a Hispania, y su hermano Cayo lo hará dos años más tarde en Licia.

La ceca campogibraltareña se hará eco de tales querencias acuñando sus unidades monetarias de más valor (dupondios) con las imágenes de los nietos de Augusto. Así, fruto de esa preocupación por asociar al poder a sus herederos, es como debemos entender los reversos de estos dupondios acuñados en Iulia Traducta sobre los años 11 o 10 a. C. Junto a los bustos, aparecen las leyendas *C(aivs) L(vcivs) CAE(saris)* y debajo el nombre de la ciudad *IVL(ia) TRAD(vcta)*. Es una manera de vincular la ciudad a los probables responsables del Estado cuando Augusto muera. La ciudad muestra de ese modo su lealtad al nuevo régimen instaurado y con sus herederos.

Los dupondios de Cayo y Lucio deben ser, pues, posteriores al año 12 a.C., una vez que quedan instituidos en herederos de Augusto tras la muerte en Campania de su padre Agripa. En cuanto a los reversos de la serie de la corona cívica, los ases deben ser posteriores al 23 a.C., ya que se trata de un tipo importado de la propia Urbe. Los abridores de cuños vinculan la ciudad con su creador por medio de un elemento tan imperial como es la corona cívica que enmarca el nombre de la nueva colonia. Dicha serie debe ser, por tanto, posterior al año 23 a.C.; se emitiría sobre los años 14/12 a.C. siguiendo paralelos de otras cecas similares (Colonia Patricia y *Iulia Gemella Acci*, la actual Guadix).

La serie de la corona cívica resulta consonante con los atributos propios de Apolo; por ejemplo, la corona de laurel, si bien las hojas, más rugosas y anchas, guardan un parecido mayor con las del roble que con las lanceoladas del laurel. Pero sea la corona de roble o de laurel, representa un mismo tipo iconográfico, la concesión del título de Augusto por el Senado. Constituye, además, una manera sencilla de que el receptor del numerario relacione de inmediato la moneda con la autoridad emisora.

Tras la emisión de los valores altos de la serie, se amonedan los valores más bajos, divisores del as, que constan de semises y cuadrantes para nuestro caso. La visión de este numerario menor difiere por completo de los dupondios y ases, aunque continúan con elementos propios de éstos. Pueden distinguirse tres grupos de amonedaciones: anversos con los bustos de Cayo y Lucio Césares, anversos con la cabeza de Augusto y anversos con símbolos sacerdotales.

Los anversos aparecen con las cabezas de Cayo y Lucio aunque, a diferencia de los dupondios, se presentan de manera individual, en sustitución de Augusto. La ceca confiere así a los herederos del *Princeps* el honor de sus monedas de valor más reducido. Al busto le acompañan dos tipos de leyenda: C. CAESAR y L. CAES.

Obviamente, la leyenda refleja el busto del personaje representado, Cayo o Lucio. Ahora las monedas necesitan, sin embargo, describir con la pertinente leyenda al personaje representado (los nietos del *Princeps*). Los reversos retoman la tradición iconográfica hispana de las cecas: la espiga de trigo, la vid o el atún. Para Mª Paz García-Bellido, dichos tipos zoomorfos o vegetales vienen considerados como expresiones de cualidades de ciertas divinidades; Francisca Chaves defiende, en cambio, una significación económica, que se repite en todas las cecas de la zona.

Cabría incluso la hipótesis de que la presencia del atún constituyera un referente indicativo de las actividades salazoneras de la propia ciudad. Con todo, parece más verosímil que los abridores de cuños utilizaran la iconografía tradicional de la zona y la conjugaran con los

METROLOGIA ROMANA

OCTAVIO AUGUSTO redujo el peso del áureo y del as. No modificó, en cambio, el denario. Las equivalencias entre las monedas de mayor uso son las siguientes:

1 áureo = 25 denarios = 100 sestercios.

1 denario = 2 quinarios = 4 sestercios = 8 dupondios = 16 ases = = 64 cuadrantes.

A veces se introduce la unidad semis = 1/2 as.

GLOSARIO

Simpulum: Especie de cazo o cucharón que usaban los sacerdotes durante los sacrificios, para evitar el contacto de las manos con el líquido purificado.

Praefericulum: Vaso sagrado consistente en un cuenco llano o a veces una jarra metálica; servía de recipiente para el vino de las libaciones rituales durante los sacrificios y para guardar los utensilios de culto a su término.

Aspergilum: Varilla para espolvorear o rociar agua bendita.

Pátera: Plato o cuenco redondeado, somero, que se usaba en ceremonias religiosas y sacrificios para derramar el vino en los altares.

Apex: Bonete de piel de cabra que llevaban los flámines en las ceremonias religiosas, rematado por hojas de olivo en la parte superior y del que pendían dos mechones a ambos lados.

nuevos tipos aparecidos a finales del siglo I a.C.

En efecto, junto a estos tipos aparecen semises y cuadrantes con los atributos pontificales y el busto de Augusto. Es el numerario de mayor uso y porta las imágenes que sus receptores están acostumbrados a ver. Todas las monedas llevan el nombre de la ciudad enmarcando el motivo iconográfico la leyenda *IVL. TRAD*.

La serie de reversos con motivos vegetales y zoomorfos debería, pues, asociarse a un momento posterior a la emisión de los dupondios y ases, ya que están destinados a convertirse en numerario común. Parece que empiezan a circular a continuación de la serie de la corona cívica sobre el 13 o 12 a.C.

Serie pontifical

Hay, además, una serie de semises y cuadrantes muy peculiar, que recoge los atributos sacerdotales de Augusto. Merece especial atención. Una primera emisión de cuadrantes acuña el anverso con la representación del *Simpulum*, esto es, el utensilio en forma de cucharón o cazo que empleaban los pontífices en las ceremonias sacras; portan la leyenda *CAES. AVG*. Sin duda, la moneda alude al cargo de pontífice máximo que Augusto desempeñó. La emisión debe ser posterior al año 12 a.C., ya que hasta esa fecha ostentó dicho honor Lépido.

Se trata, sin embargo, de una emisión de transición, previa a la gran serie de semises y cuadrantes que acuñará más adelante. El reverso nos presenta un atún rodeado por la leyenda *IVL. TRAD*. El tipo combina la tradición de reversos zoomorfos y vegetales de la ciudad con la moda impuesta por la concesión a Augusto del título de pontífice máximo. Si el nombramiento se produce en 12 a.C., su emisión debió darse en torno al año 11/10 a.C. La ceca acuñará a partir de este momento semises y cuadrantes con todo el repertorio de útiles ceremoniales en sus reversos; sus anversos quedan reservados para la efigie de un Augusto joven, de nuevo del tipo *Actium*, y la leyenda *PERM. CAES. AVG*. Lo mismo que en los dupondios y ases del primer momento.

Flanqueando la leyenda *IVL. TRAD*. se encuentra una serie de semises con el *ápex* y el *símpulo*. El primero es un bonete característico, de piel de cabra, con dos mechones de lana cayendo a ambos lados y coronado por un motivo cruciforme. El sacerdote se lo calaba para purificarse y cubrirse ante la divinidad. El *símpulo* o cazo se usaba para las libaciones rituales, para evitar rozar el líquido sagrado con las manos. Ambos motivos deben ponerse en relación con el pontificado del *Princeps*, encontrándose paralelos en varias cecas hispanas como Colonia Patricia o Guadix.

A la misma época corresponde otra emisión, esta vez de cuadrantes, con similares anversos y en cuyos reversos encontramos todos los símbolos del augurado y pontificado, esto es: la pátera, el *aspergilum*, el lituo y el *praefericulum*. Los dos últimos tipos deben fecharse sobre los años 10/9 a.C.

Cierre de la ceca

La ceca parece que no va más allá del gobierno de Augusto. No se conocen tipos acuñados con la imagen de Tiberio, que sí hallamos en cecas de similares características, como la de Guadix. Las guerras cántabras han terminado y puede que se haya generado un exceso de numerario en bronce. Además, la implantación de los nuevos valores del Principado se ha llevado a cabo con total éxito, por lo que podría prescindirse de la ceca de la ciudad. Solamente desde esta perspectiva se entiende la corta duración y la consiguiente desaparición de la ceca.

A modo de epílogo

La ceca de Iulia Traducta constituye una iniciativa más en el contexto de un complejo sistema de acciones encaminadas a la exaltación de un personaje. Mas, ¿por qué se hace necesaria dicha exaltación?

Octavio, Augusto desde el año 27 a.C., necesita presentarse ante Roma como el salvador de la República. Desde muy joven lleva combatiendo en una encarnizada guerra civil, que había comenzado en tiempos de su padre adoptivo Cayo Julio César. Es la hora de la paz. Vencido Marco Antonio en 3 a.C., Octavio se hace reconocer por el Senado como elegido por los dioses para convertirse en el tutor de los intereses del Senado y del pueblo de Roma. Va adquiriendo magistraturas republicanas hasta la total conjunción del poder constitucional en una sola persona, la principal, el *Princeps*. La construcción de un nuevo foro, la implantación de cánones artísticos o la creación de una simbología iconográfica a su servicio serán las características más relevantes del inicio de su sistema, distinto, aunque no hostil, al establecido. Una vez que se confundan tales símbolos con los del Estado romano, podremos hablar que el principado como sistema político está implantado.

Las provincias no serán ajenas a estas nuevas corrientes. Las ciudades que tengan el privilegio de acuñar moneda procurarán asociar sus cecas al Príncipe. Así ocurrió en Iulia Traducta, una pequeña colonia romana en el estrecho de Gibraltar.

El autor

Salvador Bravo Jiménez es profesor tutor de Arqueología e Historia Antigua de la península Ibérica en el Centro Asociado a la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) en el Campo de Gibraltar. Arqueólogo especialista en mundo romano, compagina su actividad docente con la de técnico arqueólogo llevando a cabo actividades arqueológicas en la zona del estrecho de Gibraltar.

Bibliografía complementaria

LAS MONEDAS DE LA BÉTICA ROMANA I: CONVENTUS GADITANUS. J. A. Sáez y J. M. Blanco; San Fernando, 1997.

LA CÓRDOBA ROMANA A TRAVÉS DE LOS TESTIMONIOS NUMISMÁTICOS: MOTIVOS ICONOGRÁFICOS. M. A. Cebrián en *Antiqvitas*, n.º 10, págs. 81-88; Priego de Córdoba, 1999.

IULIA TRADUCTA: ¿UNA COLONIA ROMANA EN LA BAHÍA DE ALGECIRAS? S. Bravo en *III Congreso de Historia de Andalucía*, págs. 97-120; Córdoba, 2003.

IULIA TRADUCTA Y TINGI: DOS CIUDADES ROMANAS EN LOS CONFINES DEL IMPERIO. S. Bravo en *XV Convegno Internazionale di Studi L'Africa Romana*, Tozeur (Túnez), 2002 (en prensa).

Marc Boada

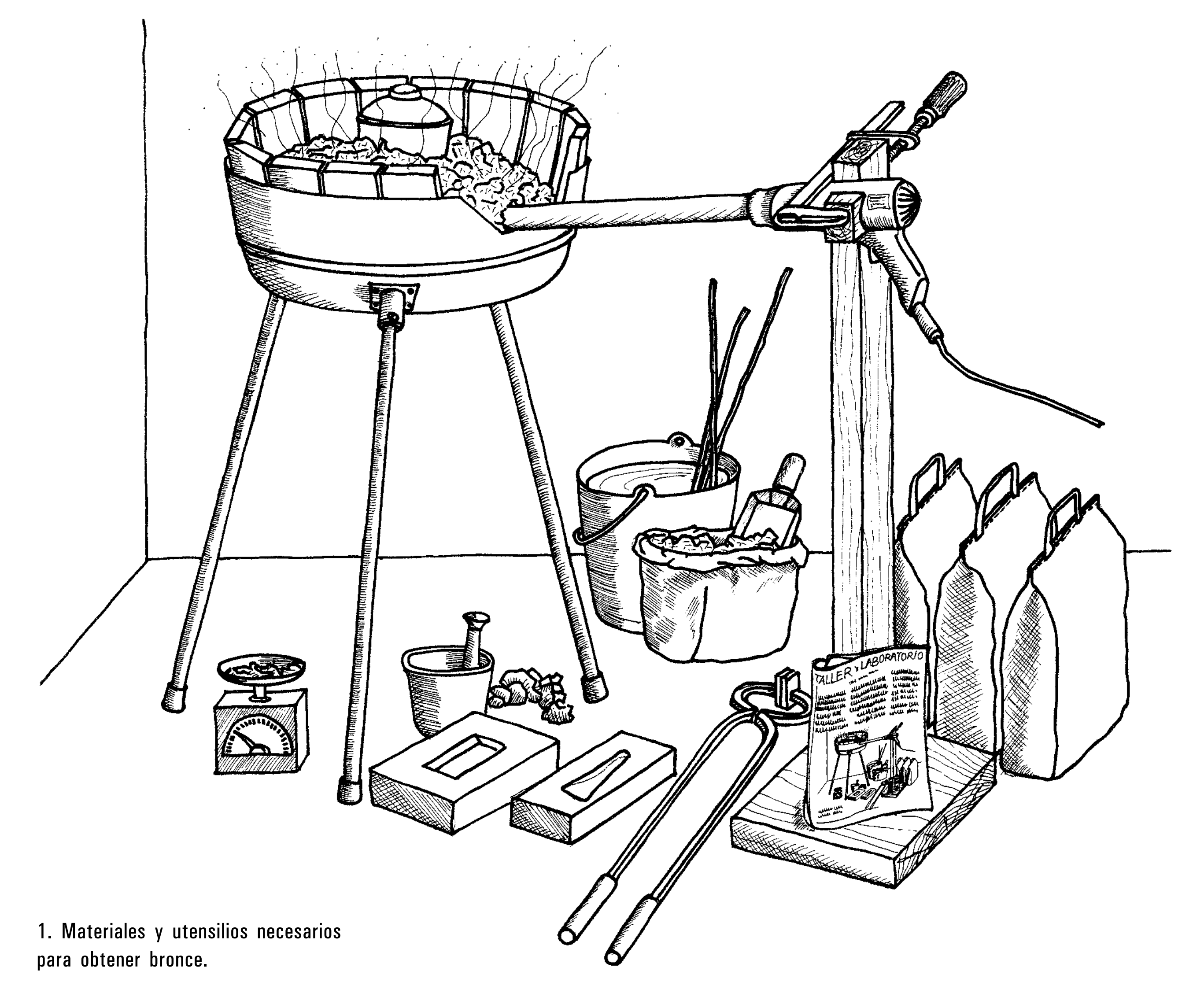
Arqueometalurgia

Cuando nuestros antepasados, hace pocos milenios, empezaron a usar los metales, la técnica experimentó un cambio notable. Hasta entonces, las herramientas eran de piedra; del pedernal se obtenían, por percusión o abrasión, los más diversos útiles. Con la aplicación del metal, las técnicas de moldeo en estado líquido y la forja nació la metalurgia, una industria que permitió fabricar artefactos precisos capaces de transformar el mundo con una eficacia inimaginable hasta entonces. Con mi compañero Antonio Palomo, arqueólogo especializado en técnica prehistórica, hemos pergeñado métodos que permiten reconstruir, con el instrumental mínimo, las artes metalúrgicas al uso durante la edad de los metales.

Los metales se caracterizan por su fusibilidad, plasticidad en caliente y tenacidad en frío. Debido a su reactividad química, escasean (en estado puro) en la naturaleza. Dado que suelen aparecer en forma de compuestos, el hombre prehistórico desarrolló métodos para extraerlos de los minerales en que se encontraban combinados.

Presentamos aquí un experimento diseñado para obtener bronce, una aleación metálica, a partir de minerales de cobre y estaño. El cobre puede encontrarse con facilidad en forma de carbonato básico; el estaño, en forma de óxido. Extraer el metal de un mineral exige un gran dominio de la pirotecnia, ya que las reacciones químicas que se desarrollan requieren energías elevadas para romper los enlaces químicos del mineral.

Se recurre a dos técnicas fundamentales: la oxidación y la reducción. La primera se aplica a minerales sulfurados; puesto que genera cantida-



1. Materiales y utensilios necesarios para obtener bronce.

MARC BOADA (*dibujo*); MOIRA COSTA (*fotografías*)

¿COMO SE OBTIENE EL BRONCE?

El bronce, la aleación metálica que marcó el final del neolítico, se obtiene a partir de una mezcla de cobre con un 8 por ciento de estaño. La transformación se produce a temperaturas elevadas. El cobre funde a 1078 ºC y el estaño a 232 ºC; pero a partir de 800 ºC se obtiene una disolución metálica líquida con una temperatura óptima de colada cercana a los 1200 ºC. Partiendo de los minerales, el proceso de reducción es como sigue:

$$CuCO_3Cu(OH)_2 + C \xrightarrow{\Delta} 2Cu + 2CO_2 + H_2O$$

MALAQUITA (mineral) — CARBON (reductor) — COBRE (metal)

$$SnO_2 + C \xrightarrow{\Delta} Sn + CO_2$$

CASITERITA (mineral) — CARBON (reductor) — ESTAÑO (metal)

Teniendo en cuenta las masas molares y la estequiometría de la reacción química, si mezclamos 1 mol de malaquita (221 gramos) con un mol de carbono (12 gramos de carbón), obtendremos unos dos moles de cobre (126 gramos). Para alearlo al 8 por ciento, necesitaremos 10 g de estaño. Los obtendremos reduciendo 0,1 mol de casiterita (15 gramos) con 0,1 mol de carbono (1,2 gramos de carbón).

En la práctica, puede reducirse ligeramente la cantidad de carbón necesaria trabajando en un crisol de grafito. Como fundente (ingrediente imprescindible) pueden utilizarse sílice, piedra caliza o espato flúor pulverizados, que, junto con el bórax, purifican la aleación.

des ingentes de vapores sulfurosos, irritantes y tóxicos, desaconsejamos el uso de minerales como la calcopirita ($CuFeS_2$). La reducción se aplica a óxidos y carbonatos; ofrece mayor comodidad, entraña menores dificultades técnicas y produce menos contaminación. Pese a todo, cuando se opera con metales líquidos, a más de 1000 ºC, toda precaución es poca ante posibles derrames, salpicaduras y emisión de gases recalentados; además, debemos protegernos de la poderosa radiación calorífica.

En primer lugar, construiremos el horno. Una buena opción consiste en recubrir el interior de una barbacoa doméstica con ladrillos y cemento refractarios. Una vez secos, estarán listos para operar.

En un mayorista de material para joyería, nos proveeremos de un crisol de grafito de unos 70 u 80 mm de diámetro, junto con su tapa y fundente (material que facilita la fusión) para bronce. El siguiente paso consistirá en adquirir los minerales de cobre y estaño. Los más adecuados son la malaquita ($CuCO_3Cu(OH)_2$, sobre todo la originaria del Zaire); la buscaremos masiva o formando concreciones; también sirve la casiterita (SnO_2), habitualmente en maclas, que separaremos de la ganga. Romperemos los bellos cristales en fragmentos de 10 o 20 mm y, junto con algunos trozos de carbón vegetal, los introduciremos en el crisol. De este mismo carbón necesitaremos unos 10 kg para usar como combustible (la cantidad dependerá del tamaño del horno).

Alcanzar una temperatura cercana a los 1200 ºC exige una fuente copiosa de oxígeno (la abundancia de oxígeno asegura una combustión completa y, por tanto, maximiza la temperatura de la llama). Para ello recurriremos a un secador de cabello, alargado con un tubo de hierro de unos 500 mm de longitud. El extremo libre de éste, la tobera, se deformará en forma de pico de pato para repartir el oxígeno sobre un mayor volumen de carbón. Este dispositivo permite llevar las brasas al rojo blanco, liberando (con un escaso rendimiento) los megajoule de energía por kilo de carbón que se requieren para reducir los compuestos, liberar los metales y fundirlos.

Acometeremos entonces el encendido del horno. Procederemos con parsimonia, buscando una dilatación gradual de la mampostería refractaria. El consumo elevado del horno exige un suministro incesante de combustible. Emplazaremos el crisol cerca de la tobera, la zona más caliente; lo envolveremos completamente en carbón, procurando que esté en contacto permanente con las brasas. Ajustaremos entonces la potencia del secador para mantener el rojo anaranjado de las brasas, hasta que el crisol entero muestre ese



2. Vertido de bronce en un molde metálico.



3. Proceso de obtención de un hacha de bronce a partir de casiterita y malaquita.

mismo color. Mantendremos esta temperatura durante unos treinta minutos. Luego, con toda precaución, abriremos el crisol y añadiremos una pequeña cantidad de fundente, que mezclaremos varias veces con una larga varilla.

Retomaremos el calentamiento durante, al menos, otra media hora. Lograremos así que los minerales se conviertan en aleación metálica. Aparecerán unos glóbulos que deberemos unir mediante agitación con una varilla de madera, cuya combustión ayudará a purificar el producto. A partir de aquí, su pureza dictará el proceso a seguir. Si hemos partido de minerales muy puros, sin ganga, hallaremos en el fondo del crisol un líquido al rojo vivo. Pero si hemos utilizado minerales impuros, con un exceso de carbón o fundente, obtendremos una esponja de consistencia pastosa; para licuarla, aumentaremos la temperatura.

En cualquier caso, conviene verter el contenido en una lingotera. Para fabricarla, llenamos una caja (un molde) con yeso. En el bloque que obtendremos, una vez seco, excavaremos un volumen aproximadamente troncocónico.

Para minimizar el riesgo de accidentes (salpicaduras o roturas, por ejemplo) la lingotera debe estar caliente; por ello, la habremos situado, desde el comienzo, cerca del fuego. Cuando el metal (ya vertido) se haya enfriado ligeramente, lo sumergiremos en agua. Al recocerlo, recuperará ductilidad. Un buen martilleado final liberará la escoria y compactará el metal.

El rendimiento del proceso resulta un tanto frustrante. Con un crisol pequeño obtendremos sólo algunas decenas de gramos de metal en cada reducción. Será necesario unir el producto de varios procesos para fundir, por ejemplo, un hacha de 300 gramos. El molde será de la misma factura que la lingotera.

Una vez dominado el proceso, estaremos en condiciones de introducir variaciones que nos aproximen todavía más a la arqueometalurgia: sustituiremos el ventilador eléctrico por unos odres de cuero, trabajaremos con toberas y crisol de cerámica, elaboraremos el molde sobre una roca arenisca, excavaremos el horno en el suelo y lo cubriremos, parcialmente, con grandes piedras. Así conseguiremos remedar la técnica de nuestros antepasados prehistóricos.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

La dote del sultán

El mes pasado terminábamos la sección proponiendo a los lectores un problema ya clásico en matemáticas: *la dote del sultán*. Un sultán tiene cien hijas y decide dar la mano de una de ellas a uno de sus súbditos si supera la siguiente prueba: Las hijas desfilarán ante el pretendiente, al que se le anunciará la dote que acompaña a cada una de ellas. El súbdito sólo podrá casarse con la hija de mayor dote si adivina cuál de ellas es. Para ello debe decidir ante cada una de las hijas si la elige para esposa o si prefiere continuar viendo al resto. Una vez rechazada una de las hijas, la decisión no se puede cambiar. Supondremos que todas las dotes son distintas y que el pretendiente no tiene ninguna información previa acerca de su cuantía. ¿Cuál es entonces la mejor estrategia para superar la prueba?

Una estrategia bastante general consiste en dejar pasar un cierto número n de hijas y después elegir la primera cuya dote supere a todas las precedentes (incluyendo las n primeras, obviamente). El problema consiste entonces en calcular el número n que maximiza la probabilidad de elegir la dote más alta.

Analicemos el problema con sólo 4 hijas. Si $n = 0$, elegiremos siempre a la primera de las hijas. Si $n = 1$, no elegiremos en ningún caso a la primera y luego esperaremos hasta que aparezca una con una dote mayor que ella. Las otras dos estrategias posibles son similares, pero con $n = 2$ o $n = 3$. Esta última, $n = 3$, es en realidad muy sencilla: puesto que se rechazan las tres primeras hijas, con esta estrategia elegiremos siempre a la última de ellas. En la tabla se analizan todas las posibilidades.

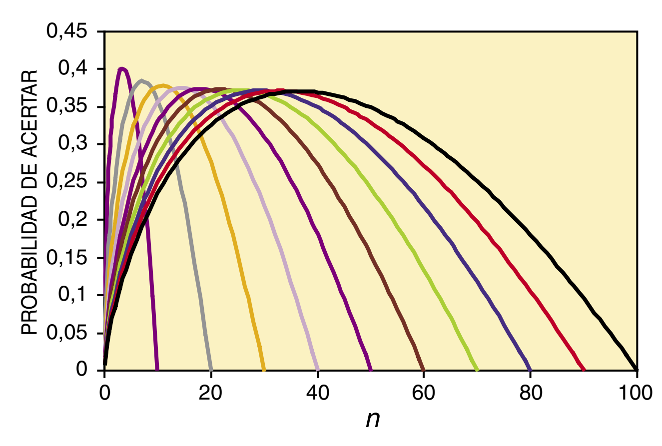
Las cuatro hijas se numeran de mayor (1) a menor dote (4). En la columna de la izquierda se presentan todas las posibles ordenaciones en las que pueden aparecer las cuatro hijas, resaltando en naranja a la de mayor dote. En el resto de las columnas se indica la hija elegida al utilizar cada una de las cuatro posibles estrategias y se destacan en verde los aciertos. Si, por ejemplo, las cuatro hijas aparecen en el orden 4, 1, 3, 2, la estrategia con $n = 0$ elegirá a la primera de ellas, es decir, a la 4, que es la de menor dote. La estrategia con $n = 1$, rechaza a la 4 y, al aparecer la 1 en segundo lugar, la acepta, superando la prueba. Sin embargo, las estrategias con $n = 2$ o $n = 3$, rechazan la 1 y se quedan ambas con la hija número 2.

Para el caso de 4 hijas, la estrategia óptima es la $n = 1$, con la que se alcanza una probabilidad de ganar 11/24 = 45,83 % (24 es el número total de casos u ordenaciones). Es una probabilidad bastante alta si la comparamos con la probabilidad de ganar si se elige una de las hijas al azar, que sería 1/4 = 25 %, la misma que tienen las estrategias con $n = 0$ y $n = 3$. Como vemos, la estrategia óptima se alcanza para un número n medio. Si n es muy pequeño, nos precipitamos y elegimos demasiado pronto, cuando es aún poco probable que haya aparecido la hija de mayor dote. Por otro lado, si n es demasiado alto, lo más probable es que la hija de mayor dote aparezca entre las n primeras y la rechacemos.

Veamos cuál es la probabilidad de acertar con N hijas habiendo rechazado a las primeras n. Acertamos si la de mayor dote está en el puesto $n + 1$ y esto ocurre con probabilidad $1/N$. También acertamos si la mayor está en el puesto $n + k + 1$, lo que ocurre con probabilidad $1/N$, y la mayor de las $n + k$ precedentes está entre las n primeras, lo que ocurre con probabilidad $n/(n + k)$. Por tanto, esta posibilidad ocurre con una probabilidad

$$\frac{1}{N}\,\frac{n}{n+k}\,.$$

Combinación				n=0	n=1	n=2	n=3
1	2	3	4	1	4	4	4
1	2	4	3	1	3	3	3
1	3	2	4	1	4	4	4
1	3	4	2	1	2	2	2
1	4	2	3	1	3	3	3
1	4	3	2	1	2	2	2
2	1	3	4	2	1	4	4
2	1	4	3	2	1	3	3
2	3	1	4	2	1	1	4
2	3	4	1	2	1	1	1
2	4	1	3	2	1	1	3
2	4	3	1	2	1	1	1
3	1	2	4	3	1	4	4
3	1	4	2	3	1	2	2
3	2	1	4	3	2	1	4
3	2	4	1	3	2	1	1
3	4	1	2	3	1	1	2
3	4	2	1	3	2	2	1
4	1	2	3	4	1	3	3
4	1	3	2	4	1	2	2
4	2	1	3	4	2	1	3
4	2	3	1	4	2	1	1
4	3	1	2	4	3	1	2
4	3	2	1	4	3	2	1
Aciertos				**6**	**11**	**10**	**6**



1. Probabilidad de acertar en función del número *n* de hijas rechazadas. Cada curva corresponde a un número total de hijas distinto: N = 10, 20, 30,..., 100.

La probabilidad de acertar es entonces la suma de estas probabilidades extendida a todos los posibles valores de *k*, que van de 0 hasta $N - n - 1$, es decir:

$$p_{acertar} = \frac{n}{N}\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n+2} + ... + \frac{1}{N-1}\right).$$

Como en el caso de cuatro hijas, tenemos que encontrar el número *n* que maximiza esta probabilidad. En la figura 1 se puede ver la probabilidad de acertar en función de *n* para distintos valores de *N*. Vemos cómo cada una de las curvas tiene un máximo que se alcanza para algún valor de *n*. Por ejemplo, para $N = 100$ hijas, el valor óptimo es $n = 37$. Es decir, la mejor estrategia consiste en rechazar las primeras 37 hijas y luego aceptar la primera que tenga mayor dote que todas las anteriores. Actuando de esta forma, la probabilidad de ganar la prueba es del 37,10 %.

Para abordar el problema de modo más general, nos pueden ayudar algunos conocimientos avanzados de matemáticas. En teoría de números y en análisis, se han estudiado con bastante detalle los llamados *números armónicos*, que se definen de la siguiente forma:

$$H_n = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + ... + \frac{1}{n}.$$

Es sencillo comprobar que la probabilidad de ganar la prueba del sultán, rechazando las *n* primeras hijas se puede escribir utilizando los números armónicos:

$$p_{acertar} = \frac{n}{N}(H_{N-1} - H_{n-1}).$$

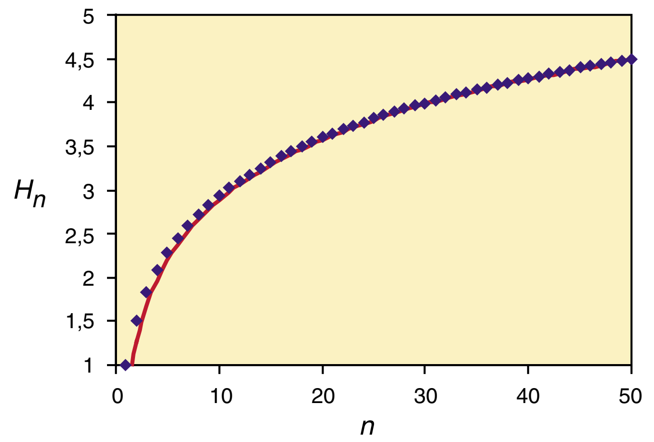
No hay una fórmula sencilla, aparte de la propia definición, que nos proporcione el valor exacto del número armónico H_n. Sin embargo, Euler encontró una fórmula aproximada para dicho valor, que es mejor cuanto mayor sea *n*:

$$H_n \approx \ln(n) + \gamma.$$

En esta fórmula, ln es el logaritmo neperiano y γ es un número que vale 0,5772 y se llama *constante de Euler-Mascheroni.* Esta constante ejerce un papel importante en distintas ramas y problemas de la matemática, como la teoría de números o el cálculo de series e integrales. La aproximación es bastante buena, como puede apreciarse en la figura 2. Si aplicamos la aproximación de Euler a la probabilidad de acertar, obtenemos:

$$p_{acertar} \approx -\frac{n}{N}\ln\left(\frac{n-1}{N-1}\right).$$

Cuando tanto *N* como *n* son muy grandes, la probabilidad de acertar depende sólo de $\alpha = n/N$, es decir, de la fracción de hijas rechazadas de antemano: $p_{acertar} \approx -\alpha \ln \alpha$. A partir de esta expresión, los lectores con algunos conocimientos de análisis matemático podrán encontrar sin mucha dificultad el valor máximo de la probabilidad de acertar: se alcanza para $\alpha = 1/e$ y vale precisamente $p_{acertar,max} = 1/e$. Casualmente, la máxima probabilidad de acertar coincide con el valor óptimo de α. En la solución aparece otro número de gran importancia en matemáticas y también ligado a Euler: el número e, que vale 2,72828... Su inverso es 1/e = 0,3679..., muy próximo al valor que hemos encontrado para el caso de 100 hijas. En realidad, hemos resuelto el problema suponiendo que α puede tomar cualquier valor, pero en realidad sólo puede tomar valores $\alpha = n/N$, con *n* entero. La solución final, siempre aproximada, sería el valor posible más próximo a 1/e, que, para $N = 100$, es precisamente $n = 37$.



2. Los puntos azules son los números armónicos exactos y la curva roja la aproximación de Euler.

Es sorprendente la alta probabilidad de acertar con la estrategia óptima. Si elegimos al azar entre 100 hijas, la probabilidad de acertar es del 1 %, mientras que si rechazamos de antemano a las 37 primeras, la probabilidad sube hasta el 37,10 %, que es mayor que un tercio. De modo que el súbdito del sultán puede albergar bastantes esperanzas de obtener la mano de la hija de mayor dote.

<parr@seneca.fis.ucm.es>

Mark Fischetti

EL YO-YO

Teoría de cuerdas

El yoyó moderno entraña mayor complejidad de la que aparenta. Bordes lastrados y ejes refinados aprovechan la física del momento angular para hacer posible toda suerte de trucos y tretas.

Se conocía en China y Grecia hace más de dos milenios. Luego, se abrió camino hacia Europa; al llegar el siglo XVIII, aquel curioso chisme ya se había convertido en uno de los juguetes favoritos de la aristocracia.

Desde los comienzos, el hilo se sujetaba al eje, con lo que los discos en rotación retornaban cuerda arriba en cuanto llegaban al final del descenso. En Filipinas, sin embargo, empezaron a sujetar el hilo en torno al eje formando un lazo; ello permitía que los discos de madera rotaran libremente (aletargados) mientras colgaban del hilo extendido. Esa innovación se convirtió en la base de numerosos trucos: 'la cuna del gato' y 'el paseo del perro', entre otros. Pedro Flores, filipino inmigrado a EE.UU., empezó a fabricar yoyós en 1928; el juguete no tardó en ponerse de moda. Barato y duradero, constituyó uno de los pocos éxitos comerciales de la Gran Depresión.

En 1932, el empresario Donald Duncan compró las acciones de Flores. Organizó competiciones multitudinarias para publicitar el producto y registró la marca "yoyó", dejando a sus competidores alternativas tan poco atractivas como el "volatín". El nombre de Duncan acabó considerándose sinónimo del juguete. En 1962, la compañía vendió 45 millones de yoyós en un país de sólo 40 millones de niños. En 1965, sin embargo, un tribunal federal falló que "yoyó" se había convertido en un término genérico. Duncan perdió la protección de su marca registrada y quebró. Más tarde, la compañía fue adquirida por Flambeau Plastics, que resucitó la marca.

Aunque el plástico y el metal empezaron a reemplazar la madera, el diseño, en esencia, se mantuvo. A finales del decenio de los ochenta y a lo largo de los noventa, varios fabricantes introdujeron un alud de perfeccionamientos —bordes lastrados, ejes con cojinetes de bolas y embragues, entre otros— que prolongaron el tiempo de letargo. El récord aumentó de forma notable: desde 51 segundos en 1991 hasta 13 minutos y cinco segundos diez años después. Esa "carrera de armamentos" ha generado "más innovaciones en el diseño desde 1990 que los habidos en los cien años anteriores", señala Don Watson. El aumento del tiempo de letargo permitió la ejecución de nuevos trucos y el resurgimiento de la popularidad que todavía hoy persiste.

1. EN LOS YOYOS TRADICIONALES (*extremo izquierdo*) el hilo está atado a un eje fijo que forma cuerpo con los dos discos. En los yoyós modernos, el hilo abraza al eje con un lazo; ello permite que los discos roten libremente, aletargados: efecto que posibilita la ejecución de numerosos trucos. Algunos diseños cuentan incluso con un manguito que gira alrededor del eje; así se reduce la fricción sobre el hilo y se prolonga el tiempo de letargo. Los discos pueden dotarse también de unas pestañas que añaden masa y aumentan el momento de inercia; ello les confiere una mayor velocidad angular y, por tanto, un tiempo de letargo aun mayor.

2. EL EMBRAGUE se mantiene desacoplado debido a la fuerza centrífuga cuando el yoyo gira a gran velocidad. Así, el huso independiente permite que los discos y el eje duerman aletargados. Cuando la velocidad de rotación aminora, esa fuerza disminuye; entonces, los muelles presionan la palanca de embrague contra el huso y éste se acopla al eje; de ese modo, ambos giran de forma solidaria y el hilo se rebobina.

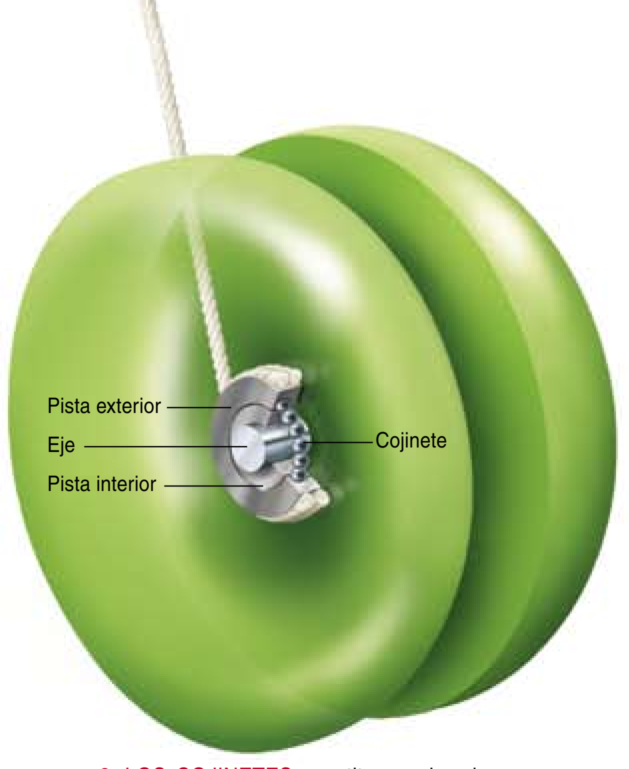
KENT SNODGRASS *Precision graphics*; BASADO EN EL MONOGRAFICO *YO-YO PHYSICS* DE DON WATSON

¿SABIA USTED QUE...?

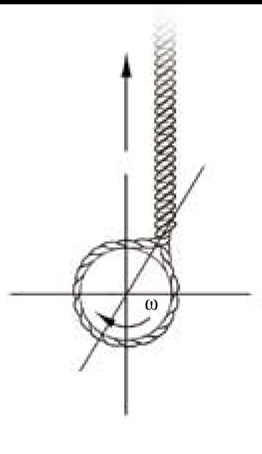
➤FISICA DEL YOYO: Al Capitán Yo, alias de Don Watson, ingeniero industrial retirado y profesional del yoyo, debemos una de las pocas descripciones minuciosas que se han publicado acerca de la física del yoyó. Se trata de cinco magníficas monografías en las que no falta detalle sobre la dinámica de este juguete: de los momentos de inercia a la generación de la velocidad de rotación.

➤DESCONECTADO: En las competiciones han irrumpido dos estilos de manejo del yoyó radicalmente distintos. En el estilo "sin hilo", la cuerda se arrolla en el eje como en una peonza. Se lanza el disco hacia lo alto para separarlo del hilo, que se emplea en los trucos a modo de cuerda floja, para finalmente recuperar el disco cazándolo a lazo por el eje. En el estilo "manos libres", un extremo del hilo se une al disco y el otro extremo a un contrapeso (no así al dedo del jugador). El jugador suelta y luego agarra el hilo, unas veces el hilo; otras, el contrapeso; provoca así que el disco rote y ejecute maniobras en el aire.

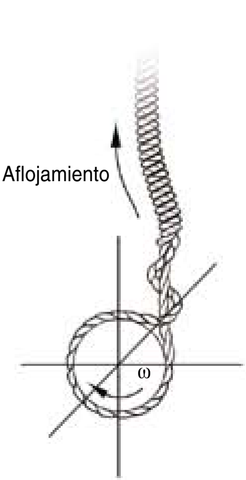
➤PRIMICIA: De la historia del yoyó se sabe muy poco. Sin embargo, se dice que el nombre del juguete fue introducido en EE.UU. por *Scientific American*. En concreto, en un artículo titulado 'Juguetes filipinos', publicado el primero de julio de 1916 en el suplemento de *Scientific American*; el artículo mostraba cómo construir un disco giratorio al que denominaba yoyó y advertía que "para manejarlo bien se requiere una destreza considerable".



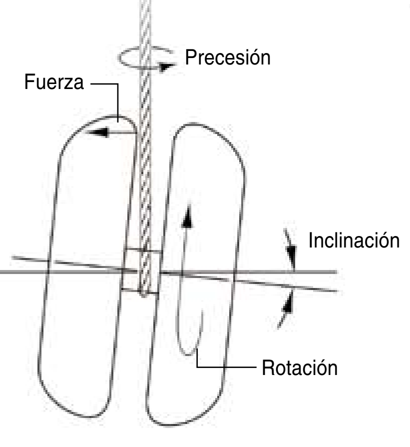
3. LOS COJINETES constituyen el mejor dispositivo para minimizar la fricción sobre el hilo y facilitar así la rotación.



5. EL ALETARGAMIENTO empieza cuando el hilo está completamente desenrollado. Un jugador que lance el artefacto hacia abajo con energía, pero mitigando el rebote bajando un poco la muñeca cuando aquél llegue al final de su descenso, comunicará la máxima velocidad angular ω a los discos; consigue con ello mayores tiempos de letargo.



6. EL RETORNO se inicia cuando el jugador tira momentáneamente del hilo. El giro de los discos hace que éstos, al cesar el tirón (*izquierda*), se eleven durante un instante; se afloja así la trenza y ésta empieza a ceder hilo alrededor del eje. El grosor de la trenza determina que el rozamiento del hilo con los discos crezca de repente; en virtud de ello, los discos se aferran al hilo y retornan trepando hilo arriba.



4. LA PRECESION hace que el yoyó se tuerza. Si el jugador mantiene el hilo, o tira del mismo, bajo un ángulo excesivo, el hilo golpea contra el borde del canto del disco, apareciendo así una fuerza que provoca que el yoyó se bambolee (precesione) en torno al hilo. Al propio tiempo, el rozamiento del hilo y el canto del disco en rotación genera una fuerza que ladea al yoyó. Los dos efectos consiguen que el juguete se descontrole.

Genética

Vuelta al organismo

GENESIS. THE EVOLUTION OF BIOLOGY, Jan Sapp. Oxford University Press; Oxford, 2003. MENDEL'S LEGACY. THE ORIGIN OF CLASSICAL GENETICS, por Elof Axel Carlson. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Cold Spring Harbor, 2004.

FUNDAMENTAL GENETICS, por John Ringo. Cambridge University Press; Cambridge, 2004. MOLECULAR BIOLOGY OF THE GENE, por James D. Watson, Tania A. Baker, Stephen P. Bell, Alexander Gann, Micael Levine y Richard Losick. Benjamin Cummings-Cold Spring Harbor Laboratory Press; San Francisco, 2004[5].

RNAI. A GUIDE TO GENE SILENCING. Dirigido por Gregory J. Hannon. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Cold Spring Harbor, 2003.

Recuerda Elof Axel Carlson (*Mendel's Legacy*) que, siendo alumno de doctorado en el meridiano de los cincuenta del siglo pasado, los que se sumaban a los nuevos enfoques moleculares y bioquímicos de la herencia llamaban "genética clásica" a la metodología empleada desde 1900 hasta 1953. Un epíteto harto paradójico, si tenemos en cuenta que las técnicas aplicadas entonces al estudio de virus y bacterias se apoyaban en los mismos recursos —cartografía de genes, cruzamiento de cepas, selección de recombinantes, agentes inductores de mutaciones y determinaciones de las tasas de mutación espontánea— que los explotados por la genética de la mosca de la fruta, el maíz o el ratón. (A la genética clásica dedica también Jan Sapp la parte tercera de su *Genesis*; la cuarta, a la genética molecular.) Andando el tiempo, cuando la genética molecular hubo solucionado la estructura y función del gen, volvería de nuevo la mirada hacia los organismos complejos.

Suelen fecharse la partida de nacimiento de la genética clásica en 1900, con el redescubrimiento de las leyes de Mendel, y su disolución final en la genética molecular en 1953, con la publicación del artículo de James D. Watson y Francis H. C. Crick sobre la estructura en doble hélice del ADN. Algunos discrepantes prefieren situar el origen en 1902, con la teoría cromosómica de la herencia propuesta por Walter Sutton, o incluso en los trabajos en torno al cruzamiento, citología y evolución de Thomas Hunt Morgan y sus discípulos entre 1910 y 1916. Por no mencionar quienes cifran el punto de arranque en los descubrimientos sobre meiosis y mitosis en el último tercio del siglo XIX. Se discrepa también en el año de cierre o culminación de esa época clásica. No les falta razón a quienes lo adelantan a 1944, cuando se obtiene la primera prueba directa de que el ADN constituía el material hereditario, a través de los experimentos, de un rigor modélico, de Oswald Avery, Maclyn McCarty y Colin MacLeod con *Pnemococcus*.

Suponía Darwin que las variaciones entre individuos, heredadas, constituían la fuente de las innovaciones evolutivas; las variaciones que ofrecían mejores posibilidades de supervivencia y reproducción se veían primadas por la selección. Pero no supo acompañar su tesis de una explicación genética solvente. Admitía la "fusión" de los caracteres de los progenitores en la fecundación. Pero tal fusión acabaría por agotar las variaciones y, con ello, el combustible evolutivo. La obra del monje Gregor Mendel sacaría de su principal atolladero a la teoría de la selección natural.

Sus ensayos revelaban que había "factores" hereditarios que se separaban nítidamente en las células germinales, aun cuando el carácter heredado visible en la progenie fuera de conformación intermedia. Mendel articuló los resultados en "Experimentos con híbridos vegetales", publicado en 1866, en la revista de la Sociedad de Historia Natural de Brünn. En su presentación describía las pautas de transmisión de los caracteres en plantas de guisantes, sus conclusiones sobre la herencia y su importancia para la teoría de la evolución. Respetado por su comunidad, que lo eligió abad en 1868, no gozó de predicamento científico entre sus contemporáneos. A Hugo de Vries, Carl Correns y Erich Tschermak se les concede el mérito del redescubrimiento de sus logros, doblado el siglo: la ley de la segregación de los alelos y la ley de la distribución independiente. La segunda hubo de matizarse muy pronto, cuando los genéticos repararon en el fenómeno del ligamiento (herencia de dos o más genes situados próximos entre sí a lo largo del mismo cromosoma).

En un comienzo, los genéticos mendelianos se declararon antidarwinistas. Con esa toma de postura se enfrentaban a los biómetras. ¿Surgían las nuevas especies gradualmente por selección natural o lo hacían de repente a través de mutaciones generalizadas? Los estadísticos, liderados por Karl Pearson y W. F. L. Weldon, defendían una evolución darwinista continua. Siguiendo a William Bateson, los genéticos mendelianos proponían una evolución discontinua, a saltos; en este bando sobresalieron los trabajos de Morgan y su escuela. A Bateson debemos los primeros manuales sobre la ciencia de la herencia, cuyo tecnicismo (genética) acuñó en 1905, voz que aunaba la idea de transmisión con la de variabilidad. Introdujo más vocablos clave (cigoto, con sus derivados homocigoto y heterocigoto, alelos y otros).

El antagonismo entre genética mendeliana y darwinismo se fue diluyendo con los años. En 1936 Ronald Fi-

sher publicaba un artículo cuyo título reflejaba la nueva situación: "¿Se ha redescubierto la obra de Mendel?". Aportábase allí una interpretación darwinista de los ensayos del monje checo. La genética había madurado ya bastante y recorrido buena parte del camino que habría de conducirla a un cuerpo sólido de doctrina, cuyos eslabones se contarían por avances significativos: teoría cromosómica de la herencia (Sutton, Cannon, Wilson y Boveri), herencia ligada al sexo (Morgan y Doncaster), ligamiento y sobrecruzamiento (escuela de Morgan y Bateson), cartografía de genes (Sturtevant y Muller), reordenaciones cromosómicas (Bridges y McClinctock), epistasis (Emerson, Correns y Hurst), poliploidía y aneuploidía (Gates, Davis y Blakeslee), genética de poblaciones (Hardy, Fisher, Haldane, Weinberg y Wright), mutaciones inducidas y espontáneas (Muller, Stadler y Auerbach).

Vale la pena rememorar algunos momentos de reseñable interés. Así, en 1901 Clarence McClung describe los cromosomas accesorios como determinantes del macho. Un año después, Bateson extiende el mendelismo a las aves de corral. En 1903 Walter Sutton asocia leyes de Mendel y alineamiento meiótico con separación de homólogos emparejados. Wilhelm Johannsen establece en 1909 la distinción entre genotipo, o composición genética del individuo, y los caracteres manifestados en el fenotipo. En 1910 Morgan descubre las primeras variaciones, relativas a alas y ojos, en la mosca del vinagre. Uno de sus colaboradores, Alfred H. Sturtevant levanta en 1913 el primer mapa cromosómico, que incluye seis caracteres. Otro discípulo, Calvin B. Bridges, pone en relación cariotipos anómalos con fenotipos en 1916, año en que Morgan, Sturtevant, Muller y Bridges resumen su puntera labor en *The Mechanism of Mendelian Inheritance*, que se traducirá al español. A modo de culminación de sus trabajos sobre mutaciones, Hermann J. Muller expone en 1927 que las radiaciones X inducen mutaciones génicas. Julia Bell y John Burdon Sanderson Haldane cartografían en 1937 los primeros caracteres humanos ligados al cromosoma X. En 1941, George W. Beadle y Edward

Código genético

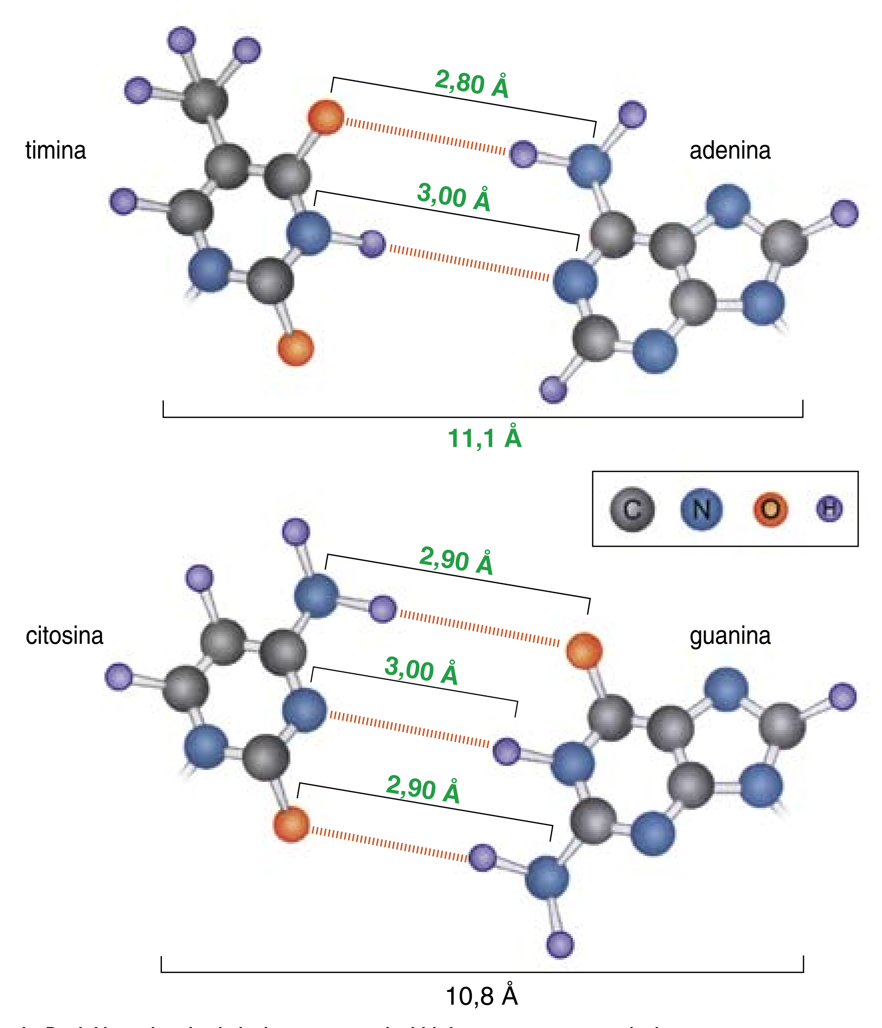
posición inicial (extremo 5')	segunda posición: U		C		A		G		tercera posición (extremo 3')
U	UUU	Phe	UCU		UAU	Tyr	UGU	Cys	U
	UUC		UCC	Ser	UAC		UGC		C
	UUA	Leu	UCA		UAA*	stop	UGA*	stop	A
	UUG		UCG		UAG*	stop	UGG	Trp	G
C	CUU		CCU		CAU	His	CGU		U
	CUC	Leu	CCC	Pro	CAC		CGC	Arg	C
	CUA		CCA		CAA	Gln	CGA		A
	CUG		CCG		CAG		CGG		G
A	AUU		ACU		AAU	Asn	AGU	Sen	U
	AUC	Ile	ACC	Thr	AAC		AGC		C
	AUA		ACA		AAA	Lys	AGA	Arg	A
	AUG	Met	ACG		AAG		AGG		G
G	GUU		GCU		GAU	Asp	GGU		U
	GUC	Val	GCC	Ala	GAC		GGC	Gly	C
	GUA		GCA		GAA	Glu	GGA		A
	GUG		GCG		GAG		GGG		G

* Codones de terminación o "sinsentido"

L. Tatum proponen la hipótesis un gen-una enzima. Dos años más tarde, Avery, McCarty y MacLeod identifican el principio transformante, el ADN, como material hereditario. En el mismo orden, llegados a 1952, Alfred D. Hershey y Martha Chase demuestran que el ADN vírico, y no la proteína envolvente, entra en la célula bacteriana huésped y que ambos componentes del virus se producen por el ADN vírico invasor.

Por fin, en 1953, apoyándose en las reglas de Chargaff y en los estudios de difracción por rayos X de Franklin y Wilkins, propusieron Watson y Crick la estructura en doble hélice del ADN. Se trata de dos cadenas polinucleotídicas que giran una entorno a la otra para dibujar una doble hélice. Las dos cadenas integrantes de la doble hélice se mantienen juntas mediante puentes de hidrógeno establecidos entre pares de bases. Adenina se une siempre a timina; guanina a citosina. Las dos cadenas no son, pues, idénticas, sino complementarias. El descubrimiento de esta relación, apuntaban en su escrito, sugería un mecanismo para la replicación del ADN en el cual cada cadena sirve de molde para su complemento.

Protagonista de excepción de la disolución del mendelismo en la genética molecular, Watson ha vuelto, en numerosas ocasiones a lo largo de los últimos cuarenta años, a replantear y articular sus fundamentos y alcance, en particular al presentar cada nueva edición de *Molecular Biology of the Gene*, texto espléndido al que el lector primerizo debiera acceder tras ahondar en las explicaciones, clarísimas y troqueladas, que John Ringo ofrece en *Fundamental Genetics*. Al núcleo de la genética molecular se le denomina "el dogma central". De acuerdo con su contenido, la información procede del ADN a la proteína a través del ARN. En efecto, una vez transcrito el ADN en ARN mensajero, éste se traduce en proteína. Con otras palabras, se trata de la expresión génica. En la etapa de transcripción, el ADN se copia en ARN con la intervención catalítica de la enzima ARN polimerasa. De las bacterias a los humanos, las ARN polimerasas se han conservado. Los



1. Posición y longitud de los puentes de hidrógeno entre pares de bases.

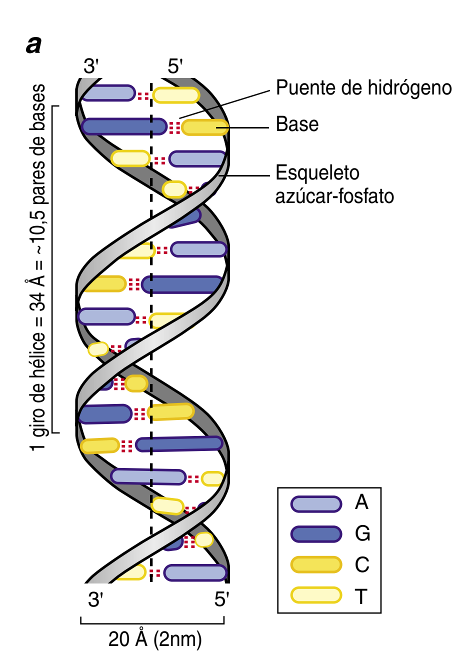
eucariotas tienen tres polimerasas diferentes; las bacterias sólo una. Para proceder a la traducción se requiere la intervención de un adaptador, del ARN de transferencia. Cada codón es reconocido por un ARNt, que está asociado a su aminoácido correspondiente. De los 64 codones potenciales, se emplean 61 para especificar los 20 que entran en la composición de las proteínas; se dejan los tres restantes para indicar el punto de terminación de la cadena. El advenimiento de técnicas de secuenciación rápida de ADN nos ha introducido en la nueva era de la genómica, que ha asistido ya a la secuenciación del genoma de diversos organismos, el humano incluido.

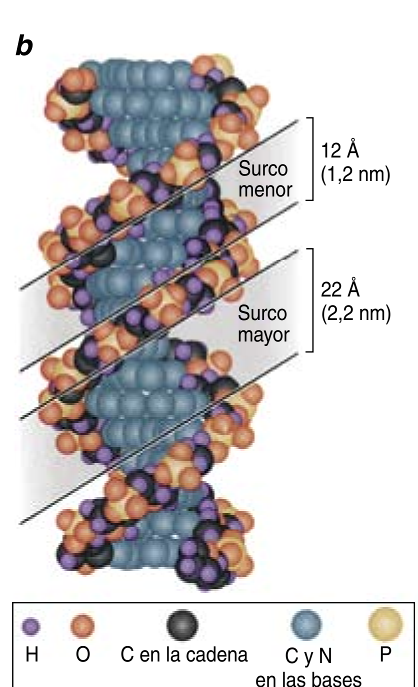
El ADN, el ARN y las proteínas son polímeros; constan, pues, de subunidades engarzadas mediante enlaces covalentes. La forma tridimensional del polímero viene determinada por las múltiples interacciones entre sus monómeros. Cada cadena de ADN es un polímero alternante de azúcares desoxirribosa y fosfatos, que se unen entre sí mediante enlaces fosfodiésteres. De cada azúcar sobresale una de las cuatro bases. Mientras que el esqueleto de azúcar-fosfato es regular, el orden de las bases es irregular y, además, responsable del contenido de información de ADN. Cada cadena presenta una polaridad 5' a 3'. Las dos cadenas proceden antiparalelas: cursan en sentido opuesto.

El emparejamiento de las bases, mediado por puentes de hidrógeno, mantiene juntas las cadenas. Se trata de una asociación específica: la adenina de una cadena se empareja con una timina de la otra cadena; la guanina opta siempre por la citosina. Las dos hebras de la doble hélice se separan —se desnaturalizan— mediante la exposición a altas temperaturas, un valor extremo de *p*H o la intervención de cualquier agente que rompa los puentes de hidrógeno. Tras una suave vuelta a las condiciones celulares normales, cada hebra desnaturalizada puede reasociarse en una hélice doble, biológicamente activa: renaturalizarse. El ADN en solución presenta una periodicidad helicoidal de unos 10,5 pares de bases por giro de hélice. La disposición relativa de los pares de bases crea una hélice con dos surcos. Puesto que los azúcares sobresalen de las bases tendiendo un ángulo de unos 120 grados, los surcos presentan un tamaño desigual. El surco más ancho —surco mayor— aporta mayor información química que el menor.

El ADN, para su síntesis, requiere la presencia de dos tipos de sustratos: los cuatro trifosfatos desoxinucleósidos (dATP, dGTO, dCTP y dTTP) y la estructura de ADN molde; este último determina la secuencia de nucleótidos incorporados. Los organismos pueden sobrevivir sólo si su ADN se replica fiablemente y se protege del daño químico y físico que cambiaría sus propiedades codificantes. En promedio, un nucleótido se cambia por error una de cada 10^9 veces. Las células disponen de un extenso repertorio de enzimas dedicadas a reparar la lesión de ADN. Unas enzimas se limitan a revertir el daño sufrido, aunque la estrategia más versátil consiste en la reparación por excisión, que elimina el segmento dañado y lo suplanta por nuevo ADN.

Entre sus peculiaridades distintivas, el ARN contiene ribosa, porta uracilo (no timina) y suele darse en una sola cadena polinucleotídica. Gracias a esa conformación unicatenaria puede plegarse sobre sí mismo para formar breves segmentos de doble hélice entre regiones complementarias. Se supone que los intrones y otros ARN sin función codificadora podrían constituir hasta el 98 por ciento de la producción transcripcional del genoma humano. Algunos ARN actúan como enzimas. Catalizan reacciones químicas en la célula e *in vitro*. A estas enzimas de ARN se las denomina ribozimas. La mayoría de los ribozimas operan sobre centros fosforosos, como en el caso de ARNasa P. El descubrimiento de enzimas de ARN que pueden operar como centros fosforosos o de carbono dio consistencia a la hipótesis de un mundo en el cual el ARN funcionaría como material genético y como maquinaria enzimática.





2. Modelos, esquemático (*arriba*) y volumétrico (*abajo*), de la doble hélice.

Nuevas aportaciones sobre la Ilustración española

MAYÁNS, PROYECTOS Y FRUSTRACIONES, por Antonio Mestre Sanchís. Publicaciones del Ayuntamiento de Oliva; Valencia, 2003. **MANUEL MARTÍ, EL DEÁN DE ALICANTE**, por Antonio Mestre Sanchís. Instituto Alicantino de Cultura. **APOLOGÍA Y CRÍTICA DE ESPAÑA EN EL SIGLO XVIII**, por Antonio Mestre Sanchís. Editorial Marcial Pons; Madrid, 2003.

Antonio Mestre ha sido durante años catedrático titular de Historia Moderna en la Universidad de Valencia, y es ahora catedrático emérito de la misma. Especialista en temas relativos a la Ilustración española, se ha especializado particularmente en la figura del ilustrado Gregorio Mayáns y Siscar (1699-1781), al que dedicó su tesis doctoral, y del que luego ha publicado en cinco volúmenes sus Obras Completas, y más tarde hasta 19 volúmenes de su copiosa correspondencia. Ahora nos da muestra de su asombrosa fecundidad con tres libros publicados en un año. El mencionado en primer lugar es un conjunto de trabajos dispersos —si bien lógicamente ordenados— sobre el papel intelectual de Mayáns y sus contactos con otros ilustrados españoles y extranjeros.

Mayáns fue siempre una figura polémica, en parte, como advierte Mestre, por desarrollar su obra en la España de los Borbones, cuando durante la guerra de sucesión había apoyado a los austracistas; y en parte también por su carácter crítico y protestatario, que le ganó muchos enemigos. El autor, con indiscutible autoridad en la materia, deslinda "luces y sombras, virtudes y defectos". Acierta a nuestro juicio cuando hace proceder el espíritu ilustrado de Mayáns de la obra de los "novatores" que escriben en la época de Carlos II, y abren el camino de lo que va a ser la Ilustración dieciochesca; también lo relaciona, porque el contacto es evidente, con Manuel Martí, conocido como "El Deán de Alicante", al que está dedicado el trabajo citado en segundo lugar.

Martí, todavía más polemista que Mayáns, filólogo grecolatino, entusiasta de Mabillon y su historia crítica, incluso dotado de ínfulas republicanas, chocó con la mayor parte de sus contemporáneos, sin dejar por eso de aportar su concurso a una visión más científica de la investigación filológica e histórica. Mayáns pudo heredar sus virtudes o alguno de sus defectos; pero tuvo mayor proyección en España y en el extranjero, al punto de que constituyó, observa Mestre, un puente de insustituible valor entre la cultura española y la europea: tanto publicando libros fuera de nuestro país, como importando ideas de los ilustrados franceses o italianos. Su choque con la Real Academia de la Historia, que quizá más por entusiasmo patriótico que por sentido crítico había publicado la un tanto fabulosa *España Primitiva* (1738) y mereció de Mayáns la inmisericorde *Censura de obras fabulosas* (1741), cortó su vida pública y propició su retirada a su casa de Oliva, donde siguió trabajando. Figura representativa de un "catolicismo ilustrado" propio de una época que intenta conciliar la fe religiosa con el libre pensamiento, cumple un papel fundamental, junto con Feijoo, entre los introductores de la Ilustración española.

El libro citado en tercer lugar es un conjunto de diversos trabajos, unos inéditos, otros publicados en el extranjero, todos interesantes en cuanto aportaciones al conocimiento de la cultura ilustrada: en ellos destacan, a nuestro juicio, "De la apología al nacionalismo" (págs. 15-44), "La imagen de España en el siglo XVIII" (págs. 47-70) y "Reflexiones sobre el marco político y cultural de la obra del P. Feijoo" (págs. 167-183), sin olvidar los estudios dedicados una vez más a Mayáns o a Cavanilles. En suma, existen motivos para agradecer al profesor de Valencia su constante y fecunda labor en el conocimiento de la cultura de nuestro siglo XVIII.

—JOSÉ LUIS COMELLAS

Los ARN no codificadores interaccionan entre sí, con el ARNm, con el ADN y con proteínas para tender nuevas redes que regulan la actividad génica con una complejidad potencial casi infinita. Si el ARN cumple, pues, funciones distintas de la mera intermediación, ¿significa ello que ha llegado el momento de dejar a un lado el dogma y replantearse por completo el papel del ARN? No parece caber la menor duda. En la comprensión de las redes reguladoras de genes basadas en ARN podría hallarse la explicación de la diferencia entre una levadura y una mosca de la fruta, o entre dos personas. Cierto es que no basta admitir la abundancia de ARN sin función codificadora para certificar que participe en redes de regulación génica; pero su implicación llegó con el descubrimiento de los microARN.

Con una veintena de nucleótidos, los microARN pasaron inadvertidos durante largo tiempo. Los primeros genes codificadores para microARN —denominados *lin*-4 y *let*-7— fueron identificados en 1993 y 2000, respectivamente. La forma en que se generan los microARN ha revelado una vinculación sugestiva con la interferencia por ARN (*RNAi: A*

Viruela

Smallpox. The Fight to Eradicate a Global Scourge, por David A. Koplow. University of California Press; Berkeley, 2003.

David A. Koplow es profesor de derecho en la Universidad de Georgetown. Entre 1997 y 1999 ejerció como consejero legal del gobierno norteamericano sobre los efectos de las armas biológicas, entre ellas la viruela. Ha publicado diversas obras acerca del control armamentístico y la seguridad nacional.

La viruela, una enfermedad que en el siglo XX mató a quinientos millones de personas, es la única infección que el hombre ha logrado erradicar. En la actualidad, el virus sólo se conserva en dos laboratorios, en Estados Unidos y Rusia respectivamente. La Organización Mundial de la Salud ha aprobado y, posteriormente, pospuesto varias veces su destrucción, una acción que eliminaría para siempre del planeta la causa de la viruela. Quienes se oponen a este plan argumentan que su desaparición impediría proseguir las investigaciones sobre él y consideran que los virus almacenados son un medio disuasor de futuros ataques bacteriológicos. Los partidarios de su erradicación afirman que los científicos ya han aprendido todo lo que se puede saber sobre el virus de la viruela y que su destrucción impediría que cayera en manos terroristas.

El autor, con una gran experiencia en la guerra bacteriológica, se encuentra altamente cualificado para aclarar la complejidad que entraña cualquier decisión en torno a este virus mortal: en este libro, la destrucción de las reservas almacenadas del mismo, la primera extinción deliberada de una especie llevada a cabo en el mundo por el hombre. Una decisión de este tipo implica áreas tan diferentes como la medicina, la biología, la ética, el control de armas, el medio ambiente o los organismos internacionales. El autor recopila una gran cantidad de material procedente de todas ellas y lo presenta estructurado en ocho capítulos que tratan sobre la epidemiología histórica de la viruela, las características biológicas del virus, su utilización como arma biológica, las repercusiones medioambientales de su desaparición, como por ejemplo la disminución de la diversidad biológica, el papel de la OMS y su autoridad para tomar una decisión de tal calibre, los dilemas éticos que se plantean al establecer un precedente de este tipo y los argumentos a favor y en contra de la destrucción del virus almacenado. El noveno capítulo recoge la opinión del autor, que toma partido por la conservación del virus, tras analizar minuciosamente las ventajas e inconvenientes de tal decisión.

La obra se completa con un aparato crítico abundante y una bibliografía que incluye fuentes muy diversas.

Escrito de forma clara y dirigido a un público amplio, sirve por igual tanto al lector no especializado como a los encargados de la salud pública, que tienen en sus manos la información necesaria para juzgar objetivamente un problema de vital importancia.

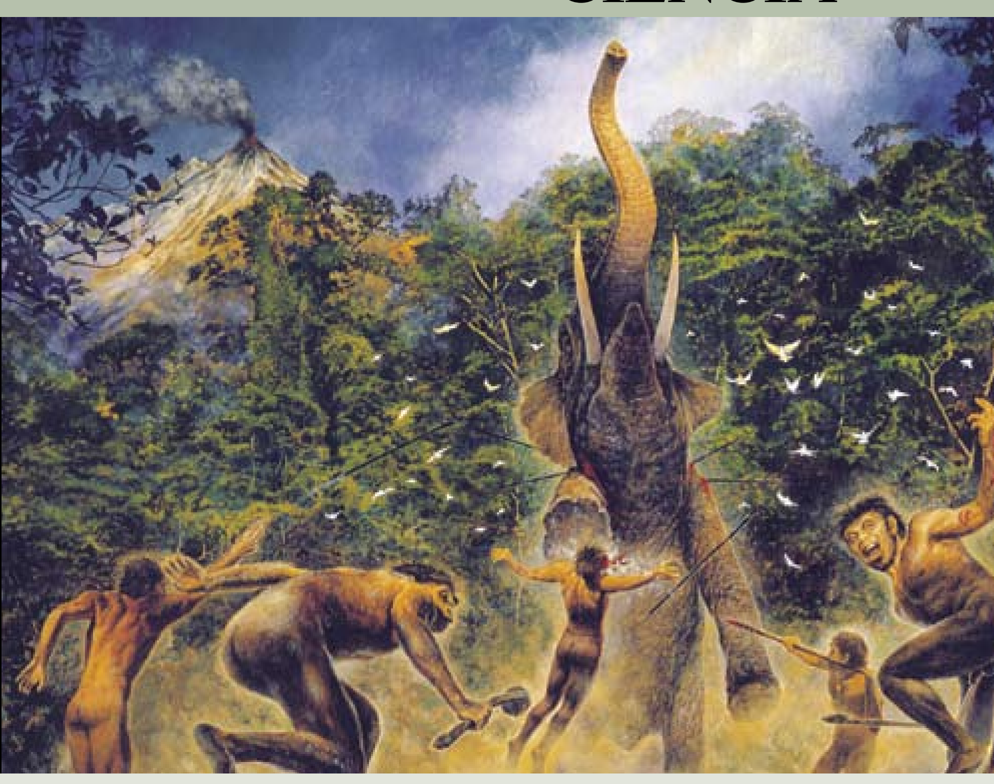
—María José Báguena Cervellera

Guide to Gene Silencing). Según se cree, este mecanismo de silenciamiento de genes defiende a las células frente a los ataques de los virus y de los genes saltadores. Entra en acción cuando la célula detecta un ARN insólito con hebras emparejadas. Una enzima denominada “Dicer” corta el ARN agresor de doble hebra, creando fragmentos de 21 a 25 nucleótidos de longitud. Las hebras individuales de estos fragmentos se enlazan a copias ulteriores del ARN original. La interferencia por ARN puede emplearse también para silenciar los genes propios de una célula, mediante la adición de secuencias de ARN de doble hebra que se ajusten con el ARNm de un gen.

La primera manifestación fenotípica de interferencia por ARN que se publicó fue la pérdida de color en las flores de petunia subsiguiente a un intento de generar pétalos intensamente coloreados mediante sobreexpresión de enzimas clave implicadas en la biosíntesis pigmentaria. Ocurrió en 1990. Ocho años más tarde, Andrew Fire y colaboradores observaron una tenaz inhibición de expresión génica endógena tras la introducción de ARN de doble hebra en *Caenorhabditis elegans*. Hoy se admite que los mecanismos silenciadores de genes que son desencadenados por el ARN de doble hebra se conservan desde los hongos hasta los mamíferos.

—Luis Alonso

INVESTIGACION y CIENCIA



EL HOMBRE DE FLORES, por Kate Wong

Un espectacular y controvertido hallazgo en Indonesia sugiere que, en un pasado no muy lejano, nuestra especie habría compartido la Tierra con un extraño homínido.

TRILOBITES, por Richard A. Fortey

Habitantes acorazados de los mares paleozoicos presentaban una diversidad asombrosa.



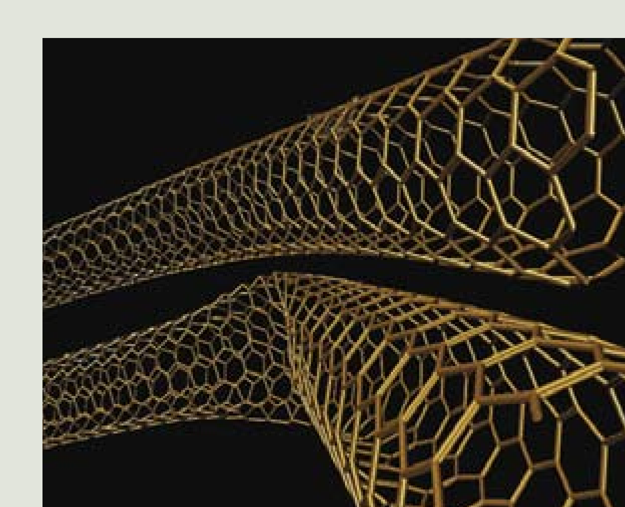
HELICOBACTER PYLORI, por Martin J. Blaser

Esta bacteria colonizadora del estómago humano protege frente a los trastornos del esófago pero aumenta el riesgo de contraer enfermedades gástricas ¿Resulta conveniente erradicarla?



LA BURBUJA LOCAL Y LA TIERRA, por Jesús Maíz Apellániz, Narciso Benítez y Matilde Cañelles

Una burbuja de gas rodea el Sol. Es muy posible que la generaran supernovas muy cercanas a nosotros. Quizá causaron también, hace dos millones y medio de años, una extinción masiva.



APLICACIONES MICROELECTRONICAS DE LOS NANOTUBOS, por Gary Stix

Nanotubos de carbono podrían utilizarse para fabricar chips de memoria de nuevo cuño.